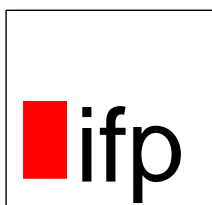


Universität Stuttgart

Masterarbeit am ifp

Lewin L. Hajer

Auslegung und Erprobung
eines reflexbasierten
Verfahrens zur
Charakterisierung von
Heliostaten



Betreuer: M.Eng. Wilko Jessen,

Dipl.-Phys. Christoph Prahl

Prüfer: apl. Prof. Dr.-Ing. Norbert Haala

Auslegung und Erprobung eines reflexbasierten Verfahrens zur Charakterisierung von Heliostaten

Masterarbeit

an der Universität Stuttgart
im M.Sc.-Studiengang Geodäsie und Geoinformatik
am Institut für Photogrammetrie (ifp)

vorgelegt von
Lewin L. Hajer

angefertigt bei
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

| | |
|-----------|-----------------------------------|
| Betreuer: | M.Eng. Wilko Jessen |
| | Dipl.-Phys. Christoph Prah |
| Prüfer: | apl. Prof. Dr.-Ing. Norbert Haala |

ZUSAMMENFASSUNG

In einem CSP-Turmkraftwerk wird mittels gebündeltem Sonnenlicht Energie erzeugt. Die Bündelung des Sonnenlichts erfolgt durch parabolisch geformte Sonnenspiegel, sogenannte Heliostaten, welche am Boden vor dem Turm positioniert sind. Einfallendes Sonnenlicht wird an den Heliostaten in Richtung eines Receivers auf dem Turm reflektiert, um dort ein Wärmeträgermedium zu erhitzen, welches eine Turbine zur Stromgewinnung antreibt. Für einen möglichst effizienten Betrieb des Turmkraftwerks ist es notwendig, dass die Heliostaten zu jeder Zeit so ausgerichtet sind, dass das Sonnenlicht direkt auf den Receiver reflektiert wird. Genaue Kenntnis über die Orientierung der Heliostaten ist daher besonders wichtig.

Bisherige Verfahren zur Orientierungsbestimmung von Heliostaten erweisen sich oft als zu langsam und zu ungenau. Es wird daher ein neuartiges Verfahren erprobt, um die Orientierung eines Heliostaten mit einer angestrebten Genauigkeit von 0.1 mrad zu bestimmen, und um Abweichungen der Spiegelfläche von der Idealform zu detektieren.

Mittels eines UAVs und einer daran angebrachten Kamera wird das Heliostatenfeld beflogen und erfasst. Nahe der Kamera sind verschiedenfarbige LEDs (Targets) platziert. Bei entsprechender Positionierung des UAVs sind in den aufgenommenen Bildern Heliostaten zu sehen, in denen sich die Reflexion des UAVs, vor allem aber der deutlich sichtbaren LED-Targets befindet. Bei genauer Kenntnis über die Position von Kamera, Target, und der Targetreflexion auf dem Heliostaten, kann der Normalenvektor der Spiegeloberfläche am Ort der Targetreflexion über Vektorrechnung bestimmt werden. Aus den Normalenvektoren können Rückschlüsse auf die Oberflächenform und die Orientierung des Heliostaten gezogen werden, sofern die Reflexionen möglichst gleichmäßig verteilt sind.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Programm entwickelt, durch welches das Messverfahren mit unterschiedlichen Konfigurationen (Positionen von Kamera und Targets) simuliert werden kann. Dabei wird für jeden Aufnahmestandpunkt der Kamera ein Orthobild des erfassten Heliostaten mit den darin sichtbaren Targetreflexionen erzeugt. Form, Größe und Anzahl der Reflexionen sind abhängig von der Oberflächenform des Heliostaten sowie den Positionen von Kamera und Targets. Anschließend erfolgt die Auswertung, welche sowohl für Orthobilder aus der Simulation, als auch für Orthobilder aus realen Aufnahmen durchführbar ist. In den Orthobildern werden die

Targetreflexionen detektiert und deren Verteilung auf dem Heliostaten wird bewertet. An den Orten der Reflexionen werden schließlich die Normalenvektoren berechnet. Die Simulation dient der Erprobung verschiedener Messsetups und liefert wichtige Informationen für die Planung der UAV-Flugroute und den darauf befindlichen Aufnahme-standpunkten der Kamera.

Eine durchgeführte Fehlerabschätzung gibt Aufschluss über die einzuhaltenden Genauigkeiten, vor allem hinsichtlich der Positionsbestimmung von Kamera, Targets und der Targetreflexionen in den Heliostaten. Zudem wurde ein zur Durchführung des Messverfahrens in der Praxis benötigter LED-Targetprototyp entworfen, mit dem bereits Versuche an echten Heliostaten durchgeführt wurden.

Diese Arbeit ist als Vorstudie zu diesem neuartigen Heliostatmessverfahren anzusehen und dient als Grundlage zur noch erfolgenden, vollständigen Umsetzung in die Praxis.

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| Abbildungsverzeichnis | ix |
| Nomenklatur | xi |
| 1 EINLEITUNG | 1 |
| 2 STAND DER TECHNIK | 3 |
| 2.1 Qualitätsparameter von Heliostaten | 3 |
| 2.1.1 Heliostataufbau | 3 |
| 2.1.2 Qualitätsparameter | 4 |
| 2.2 Vorhandene Messverfahren | 4 |
| 2.2.1 Flussschichtverfahren | 5 |
| 2.2.2 Andere optische Verfahren | 7 |
| 2.2.3 Nachteile vorhandener Verfahren | 9 |
| 3 VORSTELLUNG DES MESSPRINZIPS | 11 |
| 3.1 Grundidee | 11 |
| 3.2 Berechnung der Normalenvektoren | 12 |
| 3.3 Erwartete Vorteile des Messverfahrens | 13 |
| 3.4 Herausforderungen | 15 |
| 3.5 Bestimmung der äusseren Orientierung | 16 |
| 4 SIMULATION | 17 |
| 4.1 Motivation | 17 |
| 4.2 Vorgehen | 18 |
| 4.2.1 Allgemeine Programmstruktur | 18 |
| 4.2.2 Definition der Objekte | 18 |
| 4.2.3 Flugmuster | 20 |
| 4.2.4 Sichtbereich der Kamera | 22 |
| 4.2.5 Reflexionspositionen auf dem Heliostaten | 23 |
| 4.2.6 Bildgenerierung | 26 |
| 4.2.7 Orthobildgenerierung | 29 |
| 4.2.8 Detektion der Targetreflexionen auf dem Heliostaten | 30 |
| 4.2.9 Qualität des Bildverbands | 32 |
| 4.2.10 Bestimmung der Heliostatoberflächenform und Heliostatorientierung | 36 |
| 4.3 Ergebnisse | 36 |
| 4.3.1 Form- und Größenänderungen der Targetreflexionen | 37 |
| 4.3.2 Auswirkung des Flugmusters auf Reflexionsverteilung | 41 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.3.3 | Auswirkung der Heliostatoberflächenform auf Reflexionsverteilung | 42 |
| 5 | FEHLERABSCHÄTZUNG | 45 |
| 5.1 | Fehlerbehaftete Grössen | 45 |
| 5.1.1 | Unsicherheit der Kamera- und Targetposition | 45 |
| 5.1.2 | Unsicherheit der Targetreflexionsposition | 45 |
| 5.2 | Unsicherheit der Normalenvektorbestimmung | 47 |
| 5.3 | Ergebnis der Fehlerabschätzung | 49 |
| 6 | MESSAUFBAU | 51 |
| 6.1 | Anforderungen | 51 |
| 6.2 | Targetprototyp | 52 |
| 6.3 | Bodengestützte Messung | 54 |
| 6.3.1 | Messaufbau | 54 |
| 6.3.2 | Ergebnisse | 55 |
| 6.4 | Luftgestützte Messungen | 56 |
| 7 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK | 61 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | | |
|----------------|---|----|
| Abbildung 1.1 | Plataforma Solar de Almería | 2 |
| Abbildung 2.1 | Heliostat und Heliostatachsen | 3 |
| Abbildung 2.2 | Fehlereinflüsse auf Qualität des Heliostaten . . | 5 |
| Abbildung 3.1 | Bestimmung eines Normalenvektors | 13 |
| Abbildung 4.1 | Programmablauf | 19 |
| Abbildung 4.2 | Heliostat mit Heliostatpunktwolke | 20 |
| Abbildung 4.3 | Flugmuster mit Aufnahmestandpunkten . . . | 22 |
| Abbildung 4.4 | Grenzwertfestlegung der Winkelabweichung für die Reflexionspositionsbestimmung | 25 |
| Abbildung 4.5 | Sicht der Kamera auf den Heliostaten als Punkt- wolke | 26 |
| Abbildung 4.6 | Sicht der Kamera auf den Heliostaten als RGB- Bild | 29 |
| Abbildung 4.7 | Orthobilder | 30 |
| Abbildung 4.8 | Detektierte Targetreflexionen | 33 |
| Abbildung 4.9 | Bewertung der Reflexionsverteilung auf dem Heliostaten | 35 |
| Abbildung 4.10 | Orthobilder des Heliostaten | 38 |
| Abbildung 4.11 | Orthobilder des Heliostaten mit Kamerahöhe nahe doppelter Brennweite | 39 |
| Abbildung 4.12 | Orthobilder mit unterschiedlichen Kamerakon- stanten | 40 |
| Abbildung 4.13 | Bewertung der Reflexionsverteilung verschie- dener Flugmuster | 42 |
| Abbildung 4.14 | Reflexionsverteilung auf idealem und realem Heliostaten | 43 |
| Abbildung 5.1 | Ungewollte Vergrößerung des Reflexionsbereich bei der Orthobilderzeugung | 47 |
| Abbildung 5.2 | Unsicherheit bei der Bestimmung des Norma- lenvektors | 48 |
| Abbildung 6.1 | Targetprototyp | 53 |
| Abbildung 6.2 | Bodengestützter Versuch | 55 |
| Abbildung 6.3 | Bodengestützte Aufnahmen mit unterschiedli- chen Positionen in gleichem Abstand zum He- liostaten | 57 |
| Abbildung 6.4 | Bodengestützte Aufnahmen in unterschiedli- chem Abstand zum Heliostaten | 58 |
| Abbildung 6.5 | UAV mit Kamera und Targets | 58 |
| Abbildung 6.6 | Aufnahme des Heliostatenfelds aus der Luft bei ungünstiger Sonneneinstrahlung | 58 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 6.7 Reflexion von UAV und Targets in zwei Helio- | |
| staten | 59 |

NOMENKLATUR

ABKÜRZUNGEN

| | |
|-------------|---|
| CSP | concentrating solar power, dt.: konzentrierende Solarthermie |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. |
| EOR | exterior orientation, dt.: äußere Orientierung :Kameraposition- und Orientierung |
| GNSS | global navigation satellite system, dt.: Globales Satellitennavigationssystem |
| HSI | hue, saturation, intensity ; Farbraum |
| IOR | interior orientation Die innere Geometrie der Kamera beschreibende Parameter |
| LED | light-emitting diode, dt.: Leuchtdiode |
| PSA | Plataforma Solar de Almería, Spanien |
| QFly | Luftgestützte Qualifizierung von CSP-Kraftwerken |
| RGB | red, green, blue ; Farbraum |
| UAV | unmanned aerial vehicle, dt.: (Flug-)Drohne |

EINLEITUNG

Die wachsende Weltbevölkerung sowie die zunehmende Industrialisierung führen dazu, dass der weltweite Energiebedarf stetig zunimmt. Dieser wird derzeit noch zu einem großen Teil durch fossile Energieträger wie Kohle und Öl gedeckt. Die mit der Energiegewinnung aus diesen Brennstoffen einhergehenden schädlichen Einflüsse auf Umwelt und Klima, sowie das Wissen um deren endliche Verfügbarkeit haben zur Folge, dass verstärkt an sogenannten erneuerbaren Energien geforscht wird, welche Klima und Umwelt weit weniger belasten und quasi unerschöpflich sind.

Eine dieser erneuerbaren Energiequellen ist die Sonne, aus der auf verschiedene Art und Weise die sogenannte Solarenergie gewonnen wird. Grundsätzlich ist bei der Solarenergiegewinnung zwischen der Photovoltaik und der konzentrierenden Solarthermie (meist englisch: concentrated solar power; CSP) zu unterscheiden. CSP zeichnet sich gegenüber der Photovoltaik vor allem dadurch aus, dass die erzeugte Energie in Form von Wärme besser gespeichert werden kann.

Ein Beispiel für die Energiegewinnung mittels CSP ist ein Solarturmkraftwerk (siehe Abb. 1.1). Dieses besteht aus einem Turm, auf dem ein Absorber bzw. Receiver angebracht ist. Um den Turm ist eine Vielzahl von Sonnenspiegeln (Heliostaten) positioniert, welche das Sonnenlicht auf den Receiver reflektieren. Die dort entstehende Temperatur kann bis zu 1200 °C betragen und wird dazu benutzt, ein Wärmeträgermedium zu erhitzen, welches eine Dampfturbine antreibt und somit Strom erzeugt.

Um ein solches Kraftwerk möglichst effizient zu betreiben, ist eine exakte Ausrichtung jedes Heliostaten erforderlich. Ziel dieser Arbeit ist es, in einer Vorstudie eine neue Methode zur Bestimmung der Heliostatausrichtung zu simulieren und erproben.

Dabei handelt es sich um ein optisches Messverfahren, bei dem mittels einer auf einer autonom fliegenden Flugdrohne (englisch: unmanned aerial vehicle; UAV) angebrachten Kamera das Heliostatfeld erfasst wird. Die Ausrichtung der Heliostaten soll über die darin zu sehenden Reflexe von nahe der Kamera angebrachten Leuchtdioden (LEDs) bestimmt werden. Bei bekannten Positionen von Kamera, LED, und Reflexion, kann ein Oberflächennormalenvektor an der Reflexionsposition bestimmt werden, um Kenntnisse über Ausrichtung des Helio-



Abbildung 1.1: Plataforma Solar de Almería (PSA): Solarturmkraftwerk¹

staten sowie die Beschaffenheit der Oberfläche zu gewinnen. Die Idee des reflexbasierten und UAV-gestützten Verfahrens basiert auf dem Messsystem QFly, welches vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) zunächst für die Vermessung von Parabolrinnenkollektoren entwickelt wurde.

Diese Arbeit stellt eine Vorstudie für dieses Messverfahren dar. Darin wurde ein Simulationsprogramm entwickelt, um Erkenntnisse bezüglich des Messaufbaus (Positionierung des UAVs gegenüber den Heliostaten, Sichtbarkeit der LED-Reflexionen, Anordnung der LEDs) zu gewinnen. Außerdem wurde eine grobe Analyse der zu erwartenden Fehler sowie erste (Vor-)Versuche an echten Heliostaten durchgeführt.

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert: In Kapitel 2 werden zunächst aktuelle Verfahren zur Heliostatcharakterisierung betrachtet und eingeordnet. Die Grundlagen für das in dieser Arbeit vorgestellte Messprinzip werden in Kapitel 3 erläutert. Eine detaillierte Beschreibung des implementierten Simulationsprogramms sowie die zugehörigen Ergebnisse und Erkenntnisse sind in Kapitel 4 zu finden. Kapitel 5 enthält die zugehörige Fehleranalyse. Eine genaue Betrachtung des Messaufbaus und der für die Messung benötigten Hardware ist in Kapitel 6 beschrieben. Dort befinden sich außerdem die Ergebnisse der ersten Erprobungen der Messmethode in der Praxis. Kapitel 7 dient der Zusammenfassung der Arbeit und gibt einen Ausblick in die Zukunft.

¹ http://cadenaser.com/emisora/2017/12/29/ser_almeria/1514536978_530273.html

STAND DER TECHNIK

Im folgenden Kapitel werden der Heliostataufbau sowie die Heliostatqualitätsparameter erläutert. Anschließend sind unterschiedliche Messverfahren zur Heliostatcharakterisierung aufgeführt.

2.1 QUALITÄTSPARAMETER VON HELIOSTATEN

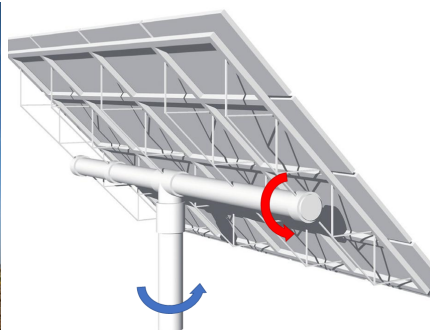
2.1.1 Heliostataufbau

Ein korrekt ausgerichteter Heliostat zeichnet sich dadurch aus, dass er Sonnenlicht unabhängig von der Position der Sonne am Himmel stets auf den selben Punkt am Solarturm reflektiert. Da sich die Sonnenposition vom Standpunkt eines Heliostaten aus betrachtet im Laufe eines Tages sowie im Laufe eines Jahres ändert, muss dessen Ausrichtung stets angepasst werden. Das Standardkonzept hierfür ist bisweilen ein Heliostat, dessen Spiegelfläche auf zwei motorisierten Achsen (Azimut- und Elevationsachse) gelagert ist (Abb. 2.1(a)). Unter Vorgabe von Azimut- und Elevationswinkel kann die Spiegelfläche entsprechend orientiert werden.

Die Spiegelfläche hat meist eine parabolische Form. Das bedeutet, dass sich die reflektierenden Strahlen parallel einfallendem Sonnenlichts in einem Punkt schneiden. Dadurch kann das Sonnenlicht auf



(a) Heliostat mit sich darin spiegelndem Turm



(b) Heliostatrückseite mit Heliostatachsen: Azimut (blau), Elevation (rot)

Abbildung 2.1: Heliostat² und Heliostatachsen³

einer kleinen Receiverfläche gebündelt werden.

2.1.2 Qualitätsparameter

Zur Beurteilung der Qualität eines Heliostaten (d.h. seiner Leistung) sind in der *SolarPACES Heliostat Performance Testing Guideline* (Röger, 2017) mehrere Parameter festgelegt, welche für jedes Heliostatmodell messbar sind. Die Heliostatperformance wird durch Fehler sowohl in der Spiegelfläche als auch in der Nachführung beeinträchtigt. Die Qualitätsparameter gliedern sich daher in die zwei Kategorien Nachführung und Spiegelfläche.

Fehler in der Nachführung haben zur Folge, dass die Spiegelfläche des Heliostaten nicht ideal ausgerichtet ist, wodurch das einfallende Sonnenlicht zu einer falschen Position hin reflektiert wird (siehe Abb. 2.2(a)).

Die Spiegeloberfläche kann durch mehrere Fehler beeinträchtigt sein: Welligkeit, nicht der Norm entsprechende Krümmung, Verkippung sowie Rauheit beeinflussen die Qualität des reflektierenden Lichtstrahls bzw. -strahlenbündels (siehe Abb. 2.2(b) bis (e)).

Um oben genannte Fehlereinflüsse auszugleichen, müssen diese zunächst gemessen werden. Die dafür angewendeten Verfahren werden im folgenden Abschnitt erläutert.

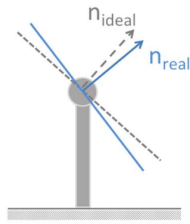
2.2 VORHANDENE MESSVERFAHREN

Für einen möglichst effizienten Betrieb eines CSP-Kraftwerks ist es notwendig, dass die Heliostaten eines Heliostatenfelds während der Betriebszeit durchgehend automatisch nachgeführt werden, so dass das Sonnenlicht zu jeder Zeit auf den Receiver reflektiert wird. Für jeden Heliostaten liegt dazu ein Bewegungsmodell vor, aus dem die Heliostatorientierung in Form von Drehung um die beiden Heliostatachsen basierend auf Eingangsparametern (Position der Sonne, Position des Receivers, usw.) bestimmt wird. Die in vorherigem Abschnitt beschriebenen Fehlereinflüsse können dazu führen, dass ein angenommenes Bewegungsmodell unpassend ist (reflektierendes Licht erreicht nicht den Receiver). Die Fehler müssen daher bestimmt und das Bewegungsmodell entsprechend angepasst werden. Im Folgenden werden diverse Verfahren dazu vorgestellt.

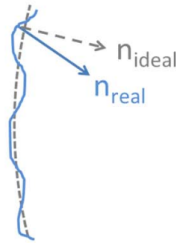
² <https://www.psa.es/en/instalaciones/receptor/cesa1.php>

³ https://www.kuebler.com/pdf/?Solar_de.pdf

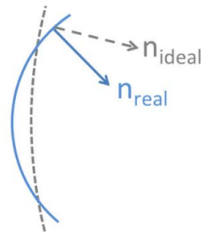
⁴ *SolarPACES Heliostat Performance Testing Guideline* (Röger, 2017)



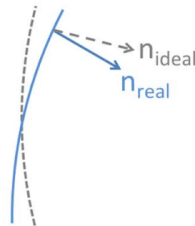
(a) Nachführungsfehler



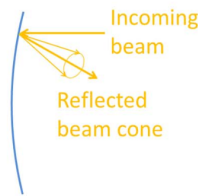
(b) Welligkeit



(c) Falsche Krümmung



(d) Verkipfung



(e) Rauhigkeit

Abbildung 2.2: Fehlereinflüsse auf Qualität des Heliostaten⁴

2.2.1 Flussdichteverfahren

Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Verfahren zur Bestimmung der optimalen Heliostatausrichtung entwickelt. Ein großer Teil davon kann zur Gruppe der sogenannten Flussdichte-basierten Verfahren zusammengefasst werden. Dabei wird auf unterschiedliche Art und Weisen geprüft, ob das am Heliostaten reflektierte Sonnenlicht am Receiver auftrifft bzw. wie stark der tatsächliche Auftreffpunkt vom Receiver abweicht, um entsprechende Korrekturen am Bewegungsmodell vorzunehmen.

Ein einfaches Verfahren, einen Heliostaten auf fehlerhafte Orientierung automatisch zu prüfen, ist, die Distanz zwischen einem Zielpunkt und dem Mittelpunkt des vom Heliostaten projizierten Sonnenstrahlzentroides zu bestimmen (Berenguel et al., 2004). Auf dem Turm eines Solarturmkraftwerks wird dazu ein *Target*, eine weiße Ebene angebracht, deren Fläche die des Receivers um ein vielfaches übersteigt. Eine Kamera erfasst das Target aus einer zentralen Position vor dem Turm. Das Target wird im Bild automatisch detektiert und dessen Mittelpunkt im Bild berechnet.

Die Targetmitte wird als Zielpunkt für einen Heliostaten vorgegeben, woraufhin dieser sich basierend auf dem zu Grunde liegenden Bewegungsmodell entsprechend ausrichtet. Auf dem Target ist nun das reflektierte Sonnenlicht in Form eines Zentroiden zu sehen, falls der Heliostat nicht grob falsch orientiert ist. Über Schwellenwertverfahren wird der Zentroid im Bild automatisch detektiert und ebenfalls dessen Mittelpunkt bestimmt. Bei perfekter Ausrichtung des Heliostaten stimmen die Mittelpunkte von Target und Sonnenstrahlzentroid überein.

Die horizontale und vertikale Abweichung zwischen den beiden Mittelpunkten im Bild wird berechnet. Zur Festlegung von Korrekturparametern müssen die in Pixeln vorliegenden Abweichungen zunächst in Meter und letztendlich in Encoderschritte für Azmiut- und Elevationsachse umgerechnet werden.

Bei einem anderen Verfahren wird anstatt eines Targets je eine Kamera links, rechts, ober- und unterhalb nahe des Receivers platziert (Kribus et al., 2004). Diese sind so ausgerichtet, dass jede Kamera das gesamte Heliostatenfeld erfasst. Jeder Heliostat wird einmalig in je einer Aufnahme pro Kamera eindeutig identifiziert, so dass die ungefähre Position jedes Heliostaten im Bild bekannt ist. Die Kameras erfassen das Feld in kurzen zeitlichen Abständen.

Falls möglich, d.h. bei geringem Kontrast, wird jede Heliostatspiegelfläche im Bild über einen Mustererkennungsalgorithmus detektiert. Andernfalls wird der Bildbereich der Spiegeloberfläche durch ein analytisches Modell abgeschätzt. Anschließend wird die durchschnittliche Helligkeit jedes Bereichs berechnet.

Die Helligkeitsdurchschnittswerte eines Heliostaten aus je einem Bild zweier gegenüber liegenden Kameras werden miteinander verglichen. Falls sich die Werte unterscheiden, ist der Heliostat nicht optimal ausgerichtet und dessen Orientierung muss korrigiert werden. Basierend auf dem Produkt aus der Helligkeitsdifferenz und einem empirisch bestimmten Skalierungsfaktor wird ein Korrekturparameter für die entsprechende Heliostatachse generiert (Kameras ober- und unterhalb des Receivers für Elevationsachse; Kameras links und rechts für Azimutachse). Dieser wird zur sofortigen Korrektur der Orientierung des Heliostaten an die Steuereinheit weitergeleitet.

Bei einem weiteren Flussdichteverfahren werden um den Receiver keine Kameras, sondern Photodioden positioniert, die reflektierendes Sonnenlicht von einem bzw. mehreren fehlausgerichteten Heliostaten erfassen (Convery, 2011). Um die Heliostaten zu unterscheiden, werden diese mit Piezoaktoren (elektrische Signale werden in mechanische

Bewegung umgesetzt) mit je einer unterschiedlichen Frequenzen zum Vibrieren gebracht. Das reflektierende Strahlenbündel schwingt dadurch mit der gleichen Frequenz. Über Fourieranalyse und Detektion der Maxima des ausgehenden Signals einer Photodiode lässt sich der reflektierende Heliostat eines Strahlenbündels eindeutig zuordnen. Die Korrekturparameter für Azimut- und Elevationsachse werden ebenfalls aus dem Signal abgeleitet.

2.2.2 *Andere optische Verfahren*

Neben den Flussdichteverfahren gibt es noch andere, weniger verbreitete Verfahren zur Ausrichtung von Heliostaten, von denen einige unabhängig vom Sonnenstand sind. Eine Auswahl davon wird im folgenden Abschnitt betrachtet.

Im Gegensatz zu den im vorherigen Abschnitt erläuterten Flussdichteverfahren, bei denen Kameras stets zum zu kalibrierenden Heliostaten hin ausgerichtet sind, besteht auch die Möglichkeit, diese auf selbigem zu positionieren. Dies wird beispielsweise angewendet, um die Sonne zu beobachten und aus deren Position Rückschlüsse auf die Heliostatorientierung zu ziehen (Peña-Cruz et al., 2012). Dafür wird eine Kamera mittig auf der Heliostatspiegelfläche positioniert und so ausgerichtet, dass ihre optische Achse mit der des Heliostaten übereinstimmt. Das Bewegungsmuster des Heliostaten gleicht während der Kalibrierung dem eines Solartrackers, d.h. der Heliostat ist stets zur Sonne hin orientiert. Die Kamera nimmt regelmäßig Bilder auf, in denen die Sonne detektiert und deren Mittelpunkt bestimmt wird. Die Positionsänderung des Sonnenmittelpunkts in den Bildern gibt Aufschluss über die Nachführgenauigkeit des Heliostaten (Drifts in Azimut- und Elevationsrichtung).

In einem ähnlichen Verfahren werden neben der Sonne eine Vielzahl anderer Punkte mit bekannten Positionen beobachtet (Sanchez, 2018). Diese werden über Bildverarbeitungsmethoden automatisch in den Bildern der Kamera detektiert und müssen dementsprechend eindeutig identifizierbar sein (z.B. Lichter, markante Gebäudeteile, Sonne, Mond). Basierend auf den Positionen der Punkte in den Bildern soll das Bewegungsmodell eines Heliostaten in einem iterativen Prozess angepasst werden.

Um einen solchen Punkt zu beobachten, wird der Heliostat mitsamt Kamera um seine Azimut- und Elevationsachse bewegt, bis er im Kamerabild detektiert wird. Zu jedem Bild wird die Punkt-ID sowie die Drehwinkelweiten beider Achsen gespeichert, welche durch sogenannte Drehgeber (Encoder) aufgezeichnet werden. Das Bewegungsmodell

berechnet aus den Encoder-Werten die Heliostatorientierung und die Position des entsprechenden Punkts im Bild. Dies erfolgt in gleicher Weise für alle anderen Punkte. Die Abweichung zwischen berechneten und tatsächlichen Punktpositionen in den Bildern wird anschließend genutzt, um das Heliostatbewegungsmodell anzupassen. Dieser Vorgang wird iterativ wiederholt, bis das Bewegungsmodell nicht mehr signifikant verbessert werden kann.

Eine Methode, um neben der Orientierung auch die Spiegeloberfläche zu analysieren, ist die sogenannte Streifenprojektion (Peña-Cruz et al., 2012). Dabei wird ein Streifenmuster mittels eines Projektors auf das Target am Kraftwerksturm projiziert. Der zu vermessende Heliostat wird so ausgerichtet, dass er das Muster vom Target in eine ebenfalls am Turm angebrachte Kamera reflektiert. Die reflektierten Streifen sind durch fehlerhafte Orientierung sowie Fehler in der Spiegelfläche verzerrt. Zur Informationsbeschaffung über die Fehlerursachen werden nacheinander vier Streifenmuster (jeweils phasenverschoben um $\pi/2$) auf das Target projiziert. Mittels Phase-Unwrapping wird anschließend die Spiegeloberfläche kartiert, wodurch etwaige Fehler in der Geometrie sichtbar werden.

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der Heliostatorientierung ist der Einsatz von Kantenerkennungsverfahren (Röger et al., 2010). Dabei wird das gesamte Heliostatfeld vom Receiverturm aus mit einer Kamera erfasst. In den aufgenommenen Bildern werden die einzelnen Heliostaten über ein Schwellenwertverfahren detektiert. Ein weiteres, aufwendigeres Schwellenwertverfahren wird auf jeden detektierten Heliostat angewendet, um die einzelnen Heliostatpaneele voneinander abzugrenzen. Deren Kanten werden extrahiert. Die Geradengleichungen werden mittels Hough-Transformation bestimmt. Die Schnittpunkte der Geraden bilden die vier Eckpunkte eines Heliostatpanels. Aus dem Seitenverhältnis und der Größe der vier Innenwinkel innerhalb eines Heliostatpanels im Bild wird letztendlich dessen Orientierung relativ zur Kamera berechnet (bekannte Position von Heliostat und Kamera vorausgesetzt).

Das Heliostatcharakterisierungsverfahren, welches dem in dieser Arbeit vorgestellten hinsichtlich der Leitidee am ähnlichsten ist, wurde von eSolar entwickelt. Über ein Heliostatfeld verteilt werden mehrere Türme aufgebaut, auf denen sich je eine Kamera befindet. Ursprünglich sollten zur Heliostatkalibrierung je mehrere Heliostaten so orientiert werden, dass sie das Sonnenlicht in Richtung einer der Kameras reflektieren, um daraus ähnlich zu anderen Flussdichteverfahren die zur Kalibration benötigte geometrische Information abzuleiten (Schell, 2011).

Um unabhängig von der Sonneneinstrahlung zu sein, wurde dieses Verfahren erweitert, indem künstliche Lichtquellen in Form von farbigen LEDs auf den Türmen installiert wurden (Zavodny et al., 2015). Ein Heliostat wird so ausgerichtet, dass er die LED eines Turmes in die Kamera des selbigen oder eines anderen Turmes reflektiert. Sobald das Licht die Kamera erreicht, wird die Intensität des Lichtstrahls ausgewertet. Basierend auf den Ergebnissen dieser Auswertung wird der Heliostat automatisch neu orientiert. Dies geschieht in Echtzeit und mehrmals hintereinander, sowie für mehrere Kamera-LED-Paare. Aus den beobachteten Drehwinkelweiten der Heliostatachsen bei Erfassung der LED-Reflexionen durch die Kamera, sowie den bekannten Positionen von Kameras, LEDs und des Heliostaten, werden die Parameter des kinematischen Modells des Heliostaten verbessert.

Die eingesetzten Kameras sind Weitwinkelkameras, wodurch die Erfassung eines großen Bereichs des Heliostatfelds ermöglicht wird. Eine sich in einem Heliostaten spiegelnde LED macht nur einen sehr geringen Teil des Kamerabilds aus. Reflektiertes Licht von unterschiedlichen Heliostaten ist daher im Bild eindeutig voneinander trennbar, wenn sich diese in einem gewissen Abstand zueinander befinden. Somit ist es möglich, pro Kamera mehrere Heliostaten gleichzeitig zu kalibrieren.

2.2.3 Nachteile vorhandener Verfahren

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Messverfahren weisen je nach Vorgehen diverse Nachteile auf, welche im Folgenden zusammengefasst werden.

Der größte Nachteil der in Kapitel 2.2.1 vorgestellten Flussdichteverfahren ist die zur Durchführung aufzuwendende Zeit. Die beiden erstgenannten Verfahren funktionieren jeweils nur für einen einzigen Heliostaten gleichzeitig. Entsprechend lange dauert die Durchführung für ein gesamtes Heliostatenfeld. Das dritte erwähnte Verfahren aus diesem Abschnitt hat diesen Nachteil nicht, da verschiedene Heliostaten Vibrationen mit unterschiedlichen Frequenzen unterliegen und somit voneinander trennbar sind. Allerdings erfordert diese Methode zusätzliche Hardware an jedem Heliostaten und ist dementsprechend teurer, während die beiden anderen Verfahren nur eine Installation von einem Target und Kameras erfordern.

Sollen auf diese Art und Weise mehrere Heliostaten gleichzeitig erfasst werden, zeigt sich ein weiterer Nachteil von Flussdichteverfahren: Die Abhängigkeit von der Sonne. Messungen können nur bei entsprechender Sonneneinstrahlung und somit nur innerhalb jenes Zeitrahmens

durchgeführt werden, in dem das Turmkraftwerk in Betrieb ist. Die zur Messung notwendige Änderung der Heliostatorientierung (Sonnenlicht wird auf ein Target und nicht mehr auf den Receiver reflektiert) verringert zu einem kleinen Teil die Leistung des Kraftwerks. Je mehr Heliostaten also mittels eines Flussdichteverfahrens gleichzeitig erfasst werden sollen, desto geringer wird die Kraftwerksleistung.

Bei den anderen optischen Verfahren in Kapitel 2.2.2 ergeben sich ebenfalls jeweils unterschiedliche Nachteile. So sind bei den ersten zwei Verfahren vorübergehende Installationen von Kameras an den Heliostaten erforderlich, was zu einem hohen Arbeits- bzw. Zeitaufwand führt. Je nach dem wie viele Heliostaten gleichzeitig kalibriert werden sollen, muss entsprechend mehr Hardware (Kosten) oder mehr Zeit eingeplant werden. Zusätzlich ist das erste Verfahren abhängig von der Sonne und hat somit den gleichen damit einhergehenden Nachteil wie die Flussdichteverfahren.

Das deflektometrische Verfahren mit Musterprojektion erfordert ebenfalls einen hohen Zeitaufwand, da hierbei nur ein Heliostat zur selben Zeit vermessen werden kann. Außerdem ist diese Methode nur nachts realisierbar.

Auch das Verfahren mit den auf zusätzlich aufgebauten Türmen angebrachten Kameras und künstlichen Lichtquellen ist nur bei Nacht durchführbar. Hinzu kommt hier ein hoher Kostenaufwand für die Kameratürme.

Ein allgemeiner Nachteil ist bei den meisten Verfahren auch die Genauigkeit, mit der Abweichungen der Heliostatorientierung ermittelt werden.

Aufgrund dieser Einschränkungen wird weiter an alternativen Verfahren zur Heliostatcharakterisierung geforscht, um diese effizienter zu gestalten. Eine solche Alternative ist das Messverfahren, welches Inhalt dieser Arbeit ist. Im nächsten Kapitel wird es detailliert vorgestellt.

VORSTELLUNG DES MESSPRINZIPS

3.1 GRUNDIDEE

Das Messverfahren soll dazu dienen, die Form der Spiegelfläche sowie das Canting (Ausrichtung im Raum) von Heliostaten zu bestimmen. Hierfür ist es notwendig, dass die Normalenvektoren an möglichst vielen Stellen der Heliostatoberfläche ermittelt werden. Form und Ausrichtung können anschließend daraus abgeleitet bzw. berechnet werden. Das Primärziel ist daher die Bestimmung dieser Vektoren. Die angestrebte Genauigkeit für das Verfahren liegt bei $0,1 \text{ mrad}$.

Die Idee hinter dem in dieser Arbeit vorgestellten Messverfahren (Göhring et al., 2017) ist, dies über luftgestützte und reflexbasierte Messungen zu realisieren. Ein Heliostatenfeld soll dabei mit einem UAV beflogen werden. Die Flugroute, auf der sich das UAV automatisch bewegt, sowie dessen Orientierung sind vorzugeben. Eine am UAV angebrachte Kamera erfasst das Feld während des Flugs. Befindet sich das UAV zum Zeitpunkt einer Aufnahme auf bzw. nahe der optischen Achse eines Heliostaten bei gleichzeitiger Orientierung hin zu diesem, so wird im aufgenommenen Bild sowohl der Heliostat selbst als auch das sich darin spiegelnde UAV zu sehen sein.

Bei bekannten Positionen von Kameraprojektionszentrum, einem sich spiegelnden Element des UAVs sowie seiner im Bild sichtbaren Reflexion auf dem Spiegel, lässt sich für jene Stelle auf dem Heliostat über Vektorrechnung die Oberflächennormale bestimmen. Aufgrund der äußeren Beschaffenheit des UAVs sowie Einflüssen des Umgebungslichts, können dessen Reflexionen im Heliostaten in ihrem Aussehen stark variieren, wodurch eine automatische Erkennung und Zuordnung einer Spiegelung deutlich erschwert wird. Es werden daher markante, eindeutig zu detektierende und identifizierende und von Lichteinflüssen möglichst unabhängige Markierungen am UAV benötigt.

Zur Markierung werden mehrere Hochleistungs-LEDs („Targets“) auf einem die Kamera teilweise umschließenden Träger platziert. Diese sind parallel zur Kamera ausgerichtet. Der Rahmen ist mit der Kamera fest verbunden, sodass sich die relativen Positionen zwischen ihr und den Targets nicht ändert. Um pro Bild möglichst viel Information zu generieren, d.h. möglichst viele Normalenvektoren zu berechnen,

werden mehrere Targets verwendet. Zur Unterscheidung deren Reflexionen sind die Targets verschiedenfarbig.

3.2 BERECHNUNG DER NORMALENVEKTOREN

Ein Normalenvektor der Spiegeloberfläche kann überall dort bestimmt werden, wo eine Reflexion eines Targets in einem der aufgenommenen Bilder zu sehen ist. Die Gleichung für gerichtete Reflexion

$$\vec{r} = \vec{v} - 2 \cdot \langle \vec{n}, \vec{v} \rangle \cdot \vec{n} \quad (1)$$

bildet die Grundlage für diese Berechnung. \vec{r} ist der Richtungsvektor eines am Spiegel reflektierten Lichtstrahls der Richtung \vec{v} . Der Vektor \vec{n} ist die Oberflächennormale derjenigen Position auf dem Spiegel, an welcher der einfallende Lichtstrahl auftrifft und reflektiert wird. Alle Vektoren sind Einheitsvektoren.

Damit eine Reflexion auf dem Spiegel im Bild sichtbar ist, muss das einfallende Licht in Richtung der Kamera reflektiert werden. \vec{r} muss folglich annähernd in die gleiche Richtung zeigen wie ein Vektor \vec{V}_{HC} , welcher vom selben Punkt der Oberfläche zum Kameraprojektionszentrum zeigt. Das einfallende Licht wird als Vektor \vec{V}_{TH} vom Target zum Heliostaten dargestellt. Eingesetzt in Gleichung (1)

$$\frac{\vec{V}_{HC}}{|\vec{V}_{HC}|} = \frac{\vec{V}_{TH}}{|\vec{V}_{TH}|} - 2 \cdot \langle \vec{n}, \frac{\vec{V}_{TH}}{|\vec{V}_{TH}|} \rangle \cdot \vec{n} \quad (2)$$

und umgeformt nach \vec{n} ergibt sich die Gleichung

$$\vec{n} = \frac{\frac{\vec{V}_{HC}}{|\vec{V}_{HC}|} - \frac{\vec{V}_{TH}}{|\vec{V}_{TH}|}}{\sqrt{2 \cdot \langle \frac{\vec{V}_{TH}}{|\vec{V}_{TH}|}, \frac{\vec{V}_{TH}}{|\vec{V}_{TH}|} \rangle - \langle \frac{\vec{V}_{TH}}{|\vec{V}_{TH}|}, \frac{\vec{V}_{HC}}{|\vec{V}_{HC}|} \rangle}} \quad (3)$$

des Normalenvektors. Es ist zu sehen, dass die Oberflächennormale abhängig ist von den Vektoren \vec{V}_{TH} und \vec{V}_{HC} . Diese wiederum hängen von den Positionen von Kamera, Target und dem Zentrum der Reflexion auf dem Heliostaten ab. In Abb. 3.1 ist dies graphisch dargestellt.

Die Kameraposition wird durch eine Bündelblockausgleichung (siehe Kapitel 3.5) bestimmt. Die Targetkoordinaten lassen sich anschließend aus der Kameraposition ableiten, da eine starre Verbindung zwischen Kamera und Targets herrscht, die durch eine Vorabvermessung des UAVs in Form von Vektoren vorliegt.

Um die Koordinaten des Reflexionsschwerpunkts \vec{R} auf dem Spiegel zu bestimmen, muss für den entsprechenden Heliostaten, basierend auf zugehörigen Referenzmessdaten sowie dem aufgenommenen Bild

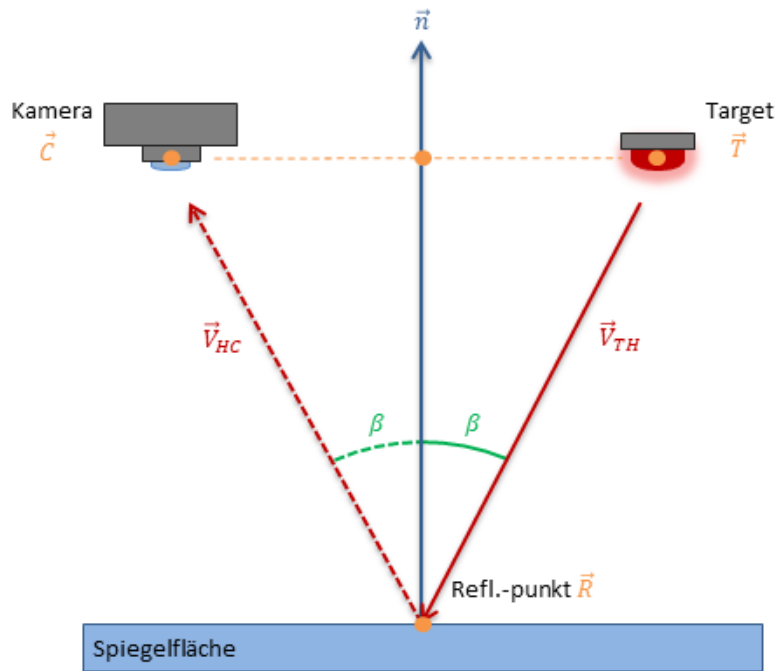


Abbildung 3.1: Schematische Seitenansicht des Messprinzips zur Bestimmung eines Normalenvektors (Abstände zwischen Kamera, Target und Heliostat nicht verhältnismäßig)

des Heliostaten, zunächst ein *Orthobild* erzeugt werden. Über Bildverarbeitungsmethoden wird - je nach Anwendung - das Reflexionszentrum bzw. der gesamte Reflexionsbereich im Orthobild detektiert und dessen Bildkoordinaten ausgelesen. Aufgrund der Eigenschaften eines Orthobilds können diese direkt in die gesuchten 3D-Koordinaten umgerechnet werden. Die Vektoren \vec{V}_{TH} und \vec{V}_{HC} werden aufgestellt und in Gleichung (3) zur Bestimmung des Normalenvektors eingesetzt.

Dies soll für jeden Heliostaten an möglichst viele Stellen der Spiegeloberfläche geschehen, um eine gute Kenntnis über dessen Oberflächenform sowie Absolutausrichtung zu erhalten.

3.3 ERWARTETE VORTEILE DES MESSVERFAHRENS

Gegenüber den in Kapitel 2.2 beschriebenen Messverfahren bietet diese Methode einige Vorteile. Diese werden im Folgenden dargelegt.

Durch den Einsatz eines UAVs ist zu erwarten, dass die Erfassung eines Heliostatenfelds deutlich schneller vonstatten geht. Die Heliostatenorientierungen müssen für die Vermessung nicht zwangsläufig

angepasst werden, sondern können auch in Betriebsposition bleiben, wenn die Flugroute entsprechend angepasst wird. Während der Messung darf sich die Heliostatorientierung allerdings nicht ändern, die Heliostaten dürfen in diesem Zeitraum nicht automatisch nachgeführt werden.

Neben der simultanen Erfassung mehrerer Heliostaten ergibt sich ein hoher Grad an Automatisierbarkeit. UAV-Bewegung und Datenerfassung (Aufnahme der Luftbilder) finden automatisch statt, auch die Weiterverarbeitung und Auswertung der Bilder bedarf nur wenig bis keiner Mitwirkung eines Menschen. Dies resultiert in Zeit- und Kostenersparnis.

Die benötigte Hardware beschränkt sich auf ein UAV mit Kamera und Targets, d.h. es sind keine baulichen Änderungen an Heliostaten oder am Turm vorzunehmen, wodurch ebenfalls Kosten gespart werden. Dadurch ist auch ein flexible Anwendung in unterschiedlichen Turmkraftwerken möglich.

Der Einsatz von LED-Targets bietet den Vorteil, dass die Vermessung unabhängig von der Sonne stattfinden kann (im Gegensatz zu den Flusssichtverfahren). Es ist dadurch möglich, Daten nachts oder bei bedecktem Himmel zu erfassen. Gleichzeitig sind LEDs bei entsprechender Leistung auch tagsüber bei wolkenlosem Himmel erkennbar, was einen Einsatz des Messverfahrens zu jeder Tages- und Nachtzeit ermöglicht.

Der durch den UAV-Einsatz in einem gewissen Rahmen selbst festzulegende Abstand der Kamera zu einem Heliostaten bietet ebenfalls einen Vorteil. Bei einem idealen (baulich perfekten) Heliostaten ist von einem sich in der Nähe dessen optischer Achse befindlichen Targets genau eine Reflexion sichtbar. Diese nimmt in ihrer Größe zu, wenn sich das Target vom Heliostaten entfernt und dem Punkt der doppelten Brennweite des Heliostaten annähert. Dieser Punkt befindet sich auf der optischen Achse des Heliostaten und ist von diesem doppelt so weit entfernt wie der Brennpunkt, in welchem die reflektierenden Strahlen parallel einfallendem Lichts zusammentreffen. Befindet sich das Target in diesem Punkt der doppelten Brennweite, so ist im gesamten Heliostat die Targetreflexion zu sehen. Entfernt sich das Target noch weiter, so dass der Punkt der doppelten Brennweite zwischen Target und Heliostat liegt, wird der Reflexionsbereich im Heliostaten wieder kleiner und die zu sehende Reflexion ist spiegelverkehrt.

Theoretisch kann für jeden Punkt der Spiegeloberfläche, welcher Teil eines Targetreflexionsbereichs ist, der Normalenvektor bestimmt werden. Eine Vergrößerung des Reflexionsbereichs bedeutet daher eine

Vervielfachung der bestimmaren Normalenvektoren. Durch Vorgabe einer Flugroute für das UAV mit entsprechend großen Abständen zu den Heliostaten kann folglich durch relativ wenige Reflexionen ein Großteil der Spiegelfläche abgedeckt und somit deren Form ermittelt werden. Gleichzeitig erfasst die Kamera durch den großen Abstand einen größeren Teil des Heliostatfelds, wodurch es insgesamt weniger Aufnahmen bedarf und somit die Flugzeit und Datenmenge reduziert wird.

Mit zunehmendem Abstand der Kamera und der Targets zum Heliostaten ergibt sich außerdem der Vorteil, dass deren Positionen zur Einhaltung der vorgegebenen Genauigkeit zur Berechnung der Normalenvektoren ($0,1 \text{ mrad}$) weniger genau bestimmt werden müssen. Im Vergleich zu den meisten anderen Messverfahren ist dieses somit auch am genauesten, sofern die angestrebte Genauigkeit eingehalten wird.

3.4 HERAUSFORDERUNGEN

Das luftgestützte, reflexbasierte Messverfahren weist trotz der erwarteten Vorteile auch einige zu bewältigende Herausforderungen auf. So muss die Sichtbarkeit der Targetreflexionen auf den Heliostaten in den Luftbildern sichergestellt sein. Das bedeutet einerseits, Kamera und Targets so zu positionieren, dass das vom Target ausgehende Licht den Heliostat erreicht und von dort in die Kamera reflektiert wird. Das in Kapitel 4 vorgestellte Simulationsprogramm liefert u.a. hierfür Vorabinformationen für die passende Positionierung. Gleichzeitig müssen die Targets derartig beschaffen sein, dass sich ihre Reflexionen sowohl von der Umgebung (meist dem sich spiegelndem Himmel) als auch untereinander deutlich unterscheiden.

Durch den Einsatz eines UAVs ergeben sich damit zusammenhängende Schwierigkeiten, wie z.B. Anfälligkeiten gegenüber Wind, der ab einer gewissen Stärke den Einsatz des UAVs zu gefährlich werden lässt. Auch leichte Windstöße können die Datenerfassung bereits beeinflussen, bspw. durch plötzliche, windbedingte Orientierungsänderung und die damit einhergehende fehlerhafte Erfassung des Heliostatfelds.

Auch die Positionsbestimmung des UAVs bzw. der Kamera und der Targets, welche für die Normalenvektorbestimmung essentiell ist, muss - je nach Abstand zum Heliostaten - entsprechend genau sein. Im nächsten Abschnitt wird die dazu angewendete Methode erläutert.

3.5 BESTIMMUNG DER ÄUSSEREN ORIENTIERUNG

Die Kenntnis über Position und Orientierung des UAVs bzw. der Kamera - der sogenannten äußeren Orientierung (exterior orientation, EOR) - relativ zu den zu vermessenden Heliostaten ist sowohl für die Orthobilderzeugung als auch für die Normalenvektorberechnung äußerst wichtig. Die EOR-Parameter setzen sich aus den drei Koordinaten des Projektionszentrums der Kamera im Objektkoordinatensystem sowie drei Drehwinkeln, welche die Kameraorientierung in diesem System beschreiben, zusammen. Zur Bestimmung dieser Parameter gibt es zwei verschiedene Ansätze.

Die herkömmliche Vorgehensweise ist eine sogenannte Bündelblockausgleichung, bei der gleichzeitig die Positionen und Orientierungen der Kamera zu den Zeitpunkten der Bildaufnahmen, die Positionen von Objektpunkten im erfassten Bereich am Boden sowie Parameter der inneren Orientierung (IOR) und Kalibrierparameter für die Kamera bestimmt werden. Nötig dafür ist eine Überlappung der von der Kamera aufgenommenen Bilder, so dass ein Teil des erfassten Bereichs in mindestens zwei, von unterschiedlichen Standpunkten aufgenommenen Bildern zu sehen ist. Innerhalb dieses Überlappungsbereichs werden in allen zugehörigen Bildern korrespondierende Punkte gesucht (meist automatisch über Mustererkennungsverfahren). Je mehr Bilder ein und denselben Verknüpfungspunkt (mit unbekannten Koordinaten im Objektkoordinatensystem) enthalten, desto mehr Beobachtungsgleichungen können aufgestellt werden. Dadurch liegen in der Regel deutlich mehr Beobachtungen als Unbekannte (Position und Orientierung der Kamera, Bildhauptpunktposition und Kamerakonstante für jedes Bild, sowie diverse Kalibrierparameter für Verzeichnungskorrektur der Kamera, Verknüpfungspunktkoordinaten) vor, weshalb zur Bestimmung dieser eine Ausgleichungsrechnung erforderlich ist. Als Startwerte dienen beobachtete Werte des GNSS-Empfängers und Neigungssensoren.

SIMULATION

4.1 MOTIVATION

Der erste Schritt, die Idee des UAV-gestützten und reflexbasierten Messverfahrens für Heliostatfelder in die Realität umzusetzen, besteht darin, das Verfahren zunächst zu simulieren. Dadurch können einerseits wichtige Vorabinformationen für die späteren Messungen im Feld generiert werden, um den Messaufbau und -ablauf daran anzupassen. Andererseits kann das Programm auch genutzt werden, um Setups auf ihre Realisierbarkeit und Qualität hin zu überprüfen. Mit Hilfe der Simulation können die Parameter für eine optimale Messung gefunden werden. Folgende Fragestellungen wurden dabei berücksichtigt:

- Position und Orientierung der Kamera:
 - Wie müssen Kamera und Targets positioniert und orientiert sein, damit sie vom Heliostaten reflektiert werden und ihre Reflexionen im Kamerabild zu sehen sind?
 - Wie sieht ein ideales Flugmuster hinsichtlich Abdeckung des Heliostaten und zurückgelegter Strecke aus?
- Reflexionen:
 - Wo befinden sich die Reflexionen auf dem Heliostaten?
 - Wie muss sich das Messsystem bewegen, damit Reflexionen über den gesamten Heliostaten verteilt sind?
- Qualität der Messung:
 - Ist die Anzahl der Reflexionen auf der Heliostatoberfläche ausreichend?
 - An welchen Stellen sind welche Fehlereinflüsse zu erwarten und wie groß sind diese?

Ein Teil des Programms (Detektion der Reflexionen, Berechnung der Heliostatorientierung, Qualitätsabschätzung) dient auch zur Auswertung realer Messdaten.

4.2 VORGEHEN

4.2.1 Allgemeine Programmstruktur

Der grobe Ablauf des Simulationsprogramms ist in Abb. 4.1 dargestellt. Zunächst werden alle benötigten Parameter eingelesen, und darauf basierend die Objekte (Kamera, Targets, Heliostat) und die aus einzelnen Standpunkten bestehende Flugroute erstellt. Für jeden Standpunkt wird anschließend der Kamerasichtbereich berechnet, sowie die Position der Targetreflexionen auf dem Heliostaten bestimmt. Sind Reflexionen für die Kamera sichtbar, wird der Kamerasichtbereich zur weiteren Verarbeitung erst in ein Bild, anschließend zu einem Orthobild umgewandelt, in dem nur der Heliostat selbst zu sehen ist. Danach werden die Targetreflexionen in den Orthobildern aller Standpunkte über Bildverarbeitungsmethoden detektiert und deren Verteilung auf dem Heliostaten beurteilt. Ist die Reflexionsverteilung ausreichend, können an deren Positionen die Normalenvektoren der Heliostatoberfläche berechnet werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Programmteile genauer betrachtet.

4.2.2 Definition der Objekte

Zunächst müssen die für das Messverfahren relevanten Objekte definiert werden. Speziell handelt es sich hierbei um die Kamera, die darum positionierten LED-Targets, sowie den bzw. die Heliostaten. Im Folgenden werden die Objekte einzeln beschrieben.

Kamera

Die dem Programm zur Kameradefinition zu übergebenden Parameter lassen sich in die Kategorien äußere Orientierung (EOR) und innere Orientierung (IOR) gliedern. Als äußere Orientierung werden sechs Parameter bezeichnet, welche die Position (X , Y , Z) und Orientierung (ω , ϕ , κ) der Kamera (genauer: des Kameraprojektionszentrums) im Objektkoordinatensystem beschreiben. Zur inneren Orientierung gehören neben den Koordinaten des Bildhauptpunkts (x_0 , y_0) im Kamerakoordinatensystem und der Kamerakonstanten (c ; wird auch als Brennweite bezeichnet) auch eine Vielzahl Verzeichnungs-korrekturparameter sowie die Sensorgröße.

Targets

Aufgrund der starren Verbindung mit der Kamera sind die Positionen und Lage der LED-Targets abhängig von ihrer äußeren Orientie-

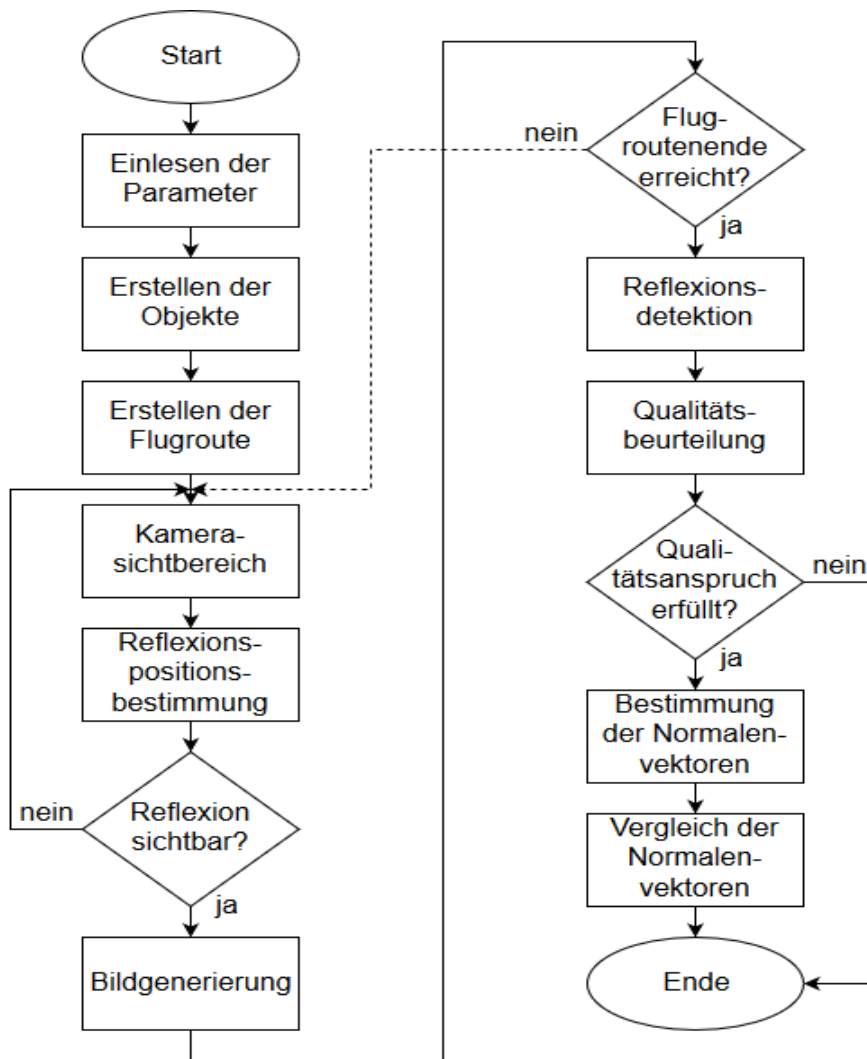


Abbildung 4.1: Programmablauf

rung. Es ist daher für jedes Target nur ein Vektor vorzugeben, der die Target-Position relativ zum Projektionszentrum der Kamera beschreibt. Zusätzlich dazu wird jeweils ein zweiter Vektor mit drei Einträgen vorgegeben, welcher der Farbe der jeweiligen LED im RGB-Farbraum entspricht.

Heliostat

Der Heliostat besteht aus einer Menge an Heliostatpunkten, die dessen Oberfläche darstellen. In Abb. 4.2 ist dies beispielhaft dargestellt. Die Oberflächengröße und -form wird entweder frei definiert oder anhand von Messdaten festgelegt. Bei der freien Definition kann als Form zwischen einer Ebene und einem elliptischen Paraboloid gewählt werden. Die Ebene wird durch einen vorzugebenden Normalenvektor erstellt, für das Paraboloid ist eine Brennweite vorzugeben. Die Größe

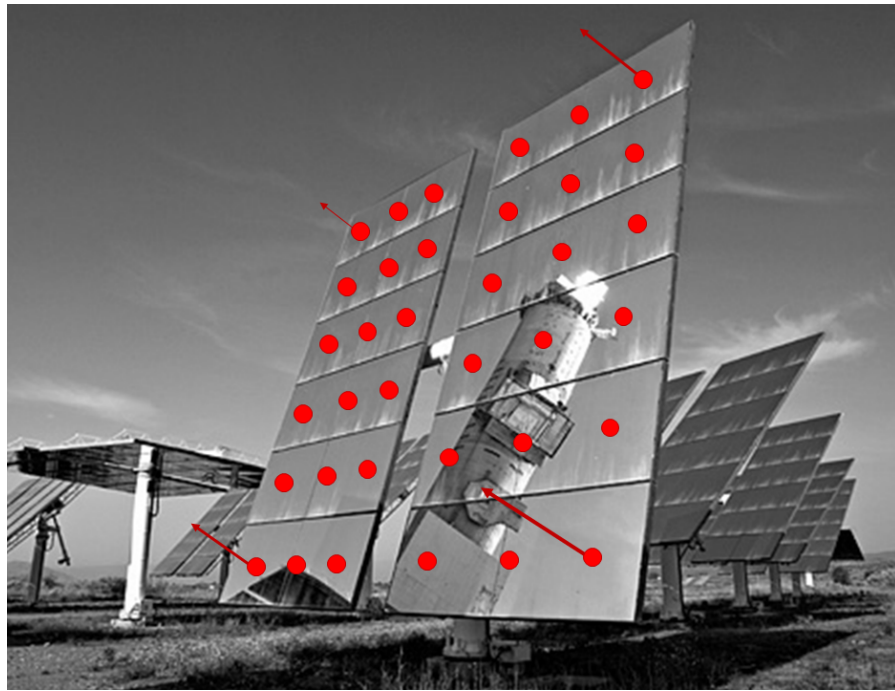


Abbildung 4.2: Heliostat mit angedeuteter Heliostatpunkt wolke (rot) und Normalenvektoren in den vier Eckpunkten

der Punktwolke (Anfang und Ende) sowie die Dichte (der Abstand zwischen den Heliostatpunkten) ist für beide Fällen ebenfalls vorzugeben. Im Falle des Paraboloids wird für jeden Heliostatpunkt der Normalenvektor berechnet.

Bei Verwendung von Messdaten realer Heliostaten aus vorherigen Heliostatcharakterisierungen müssen die Koordinaten der Heliostatpunkte ebenso enthalten sein wie die idealen sowie gemessenen Normalenvektoren an diesen Stellen. Teilweise ist es hierbei nötig, einzelne fehlende Normalenvektoren zu interpolieren.

4.2.3 Flugmuster

Um die Bewegung des UAVs gegenüber dem Heliostat zu simulieren, wird eine Matrix mit einzelnen Weg- bzw. Aufnahmestandpunkten im Objektkoordinatensystem aufgestellt. Diese soll unter Vorgabe möglichst weniger und einfacher Parameter automatisch erzeugt werden. Als „Flugmuster“ gibt es die Wahl zwischen zwei grundsätzlichen Bewegungsmustern, welche eine gute Abdeckung durch Aufnahmestandpunkte bei möglichst kurzer Gesamtstrecke darstellen: mäander- oder spiralförmig. In beiden Fällen bewegt sich das UAV dabei in einer Ebene im Objektraum vor dem Heliostaten. Die Standpunktmatrix zunächst in einem lokalen, zweidimensionalen Koordinatensystem

aufgebaut, und anschließend in das Objektkoordinatensystem transformiert und an die vorgegebene Startposition der Kamera bzw. des UAVs angepasst. Um gleichmäßige Formen und Verteilung der Reflexionen auf dem Heliostat zu bewirken, muss die Distanz zwischen Kamera und Heliostat an jedem Aufnahmestandpunkt ungefähr gleich sein (optische Achse des Heliostaten ist senkrecht zur Ebene, in welcher die Flugroute liegt).

Eine dritte Option ist die Vorgabe einer geradlinigen Flugroute. Diese dient hauptsächlich dazu, Standpunkte entlang der optischen Achse eines Heliostaten zu generieren, um den Einfluss des Abstands von Kamera und Heliostat auf die Reflexionen darzustellen. In der Realität wird diese Form im Gegensatz zu den oben genannten Mustern nicht eingesetzt.

Mäander

Ein einfaches Mäander (Abb. 4.3(a)) setzt sich aus einer bestimmten Anzahl zweier gerader Teilstrecken zusammen, welche in abwechselnder Reihenfolge aneinander angehängt sind. Die Bewegungsrichtung bleibt dabei auf einer Teilstrecke immer gleich, während sie auf der anderen jeweils im Wechsel das Vorzeichen ändert.

Die mäanderförmige Flugroute wird demnach aus zwei vorzugebenden Vektoren aufgebaut. Über diese werden die Ausrichtungen der Strecken gesteuert. Außerdem sind die Vektoren so zu definieren, dass ihre Längen dem gewünschten Abstand zwischen zwei Aufnahmestandpunkten auf der entsprechenden Teilstrecke gleichen. Sollen sich auf einer Teilstrecke mehrere Aufnahmestandpunkte befinden, so wird der zugehörige Vektor entsprechend oft aneinander gereiht. Liegen keine Aufnahmestandpunkte auf einer Teilstrecke, gleichen sich Strecke und Vektor. Diese Skalierung wird über je einen zusätzlichen Parameter festgelegt. Ein dritter Eingangsparameter regelt die Anzahl der Wiederholungen der einzelnen Teilstrecken.

Spirale

Für eine spiralförmige Flugroute (Abb. 4.3(b)) werden andere Parameter benötigt. Hier müssen vorab die Anzahl der Kamerastandpunkte, sowie Start- und Endpunktradius und -winkel der Spirale angegeben werden. Aufgebaut wird die Spirale in einem polaren Koordinatensystem.

Zur Berechnung der kartesischen Koordinaten jedes Standpunkts auf der Spirale müssen zunächst deren Winkel und Radien bestimmt

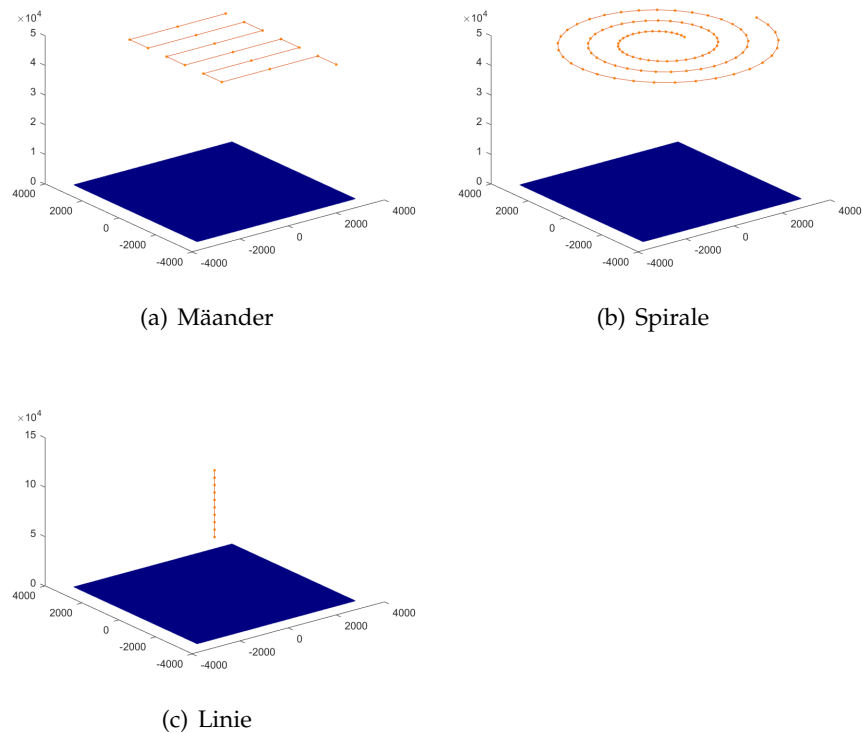


Abbildung 4.3: Verschiedene Flugmuster mit Aufnahmestandpunkten (orange) über einem Heliostaten (blau)

werden. Die Winkel ergeben sich aus der - der vorgegebenen Anzahl entsprechenden - gleichmäßigen Unterteilung des Bereichs zwischen Anfangs- und Endwinkel. Gleiches gilt für die Radien. Die kartesischen Koordinaten ergeben sich aus der Multiplikation des Radius mit dem Sinus bzw. Kosinus des Winkels.

Linie

Die einfachste Form einer Flugroute ist die Linie (Abb. 4.3(c)). Vorzugeben sind ähnlich wie beim Mäander ein Richtungsvektor, dessen Länge dem Abstand zwischen zwei Aufnahmestandpunkten auf der Linie entspricht, sowie ein Parameter, der die Anzahl der Standpunkte übergibt.

4.2.4 Sichtbereich der Kamera

Im nächsten Schritt werden basierend auf der äußeren und inneren Orientierung der Kamera zunächst diejenigen Heliostatpunkte bestimmt, die sich im Sichtfeld der Kamera befinden. Die Koordinaten der Heliostatpunkte müssen dafür zunächst mit Hilfe der Kollineari-

tätsgleichungen in das Bildkoordinatensystem transformiert werden.

Zuerst werden hierfür die um die Kamerakoordinaten reduzierten Heliostatpunkte unter Zuhilfenahme der Orientierungswinkel der Kamera vom Objekt- in das Kamerakoordinatensystem rotiert. Die x -, y -Ebene bildet den CCD-Sensor der Kamera, die Blickrichtung ist entgegen der z -Achse. Daher können alle Heliostatpunkte mit einer z -Koordinate größer als 0 bereits als nicht-sichtbar eingestuft werden, da sie sich „hinter“ dem CCD-Sensor befinden.

Die x - und y -Koordinaten der Heliostatpunkte werden durch die zugehörige z -Koordinate dividiert und mit der Kamerakonstanten multipliziert, wodurch die Heliostatpunkte in das zweidimensionale Bildkoordinatensystem überführt werden. In diesem Koordinatensystem liegt eine Fläche, welche den CCD-Sensor der Kamera darstellt. Die Maße sind in der inneren Orientierung festgelegt. Alle Heliostatpunkte, die im Bildkoordinatensystem außerhalb dieser Fläche liegen, sind für die Kamera nicht sichtbar.

Da dies dem Fall einer idealen Zentralprojektion entsprechen würde, die Kamera jedoch eine bestimmte Verzeichnung aufweist, muss diese ebenfalls berücksichtigt werden. Dafür muss eine inverse Berechnung einer radial-symmetrischen Verzeichnungskorrektur stattfinden. Nach Umwandlung der Heliostatpunktkoordinaten in „unkorrigierte“ Koordinaten (im zweidimensionalen Kamerakoordinatensystem) werden diejenigen Punkte eliminiert, die nun außerhalb der CCD-Fläche liegen. Die verbleibenden Punktkoordinaten, die noch in der Einheit mm vorliegen, werden abschließend in Pixelkoordinaten umgewandelt.

4.2.5 Reflexionspositionen auf dem Heliostaten

Alle Heliostatpunkte, die nach dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Verfahren noch übrig bleiben, sollen nun dahingehend geprüft werden, ob sie das von den Targets ausstrahlende Licht in die Kamera reflektieren, und die Targetreflexion somit im Bild sichtbar ist. Die Grundlage zur Berechnung bildet die Reflexionsgleichung (1) aus Kapitel 3.2.

Zunächst werden die Vektoren \vec{V}_{TH} zwischen Target und jedem für die Kamera sichtbaren Heliostatpunkt sowie die Vektoren \vec{V}_{HC} zwischen den Heliostatpunkten und Kamera berechnet und normiert. Die Vektoren \vec{V}_{TH} , welche das einfallende Licht des Targets darstellen, werden ebenso wie die Normalenvektoren der Heliostatpunkte \vec{n} in Formel (1) eingesetzt. Das Ergebnis \vec{r} sind die Vektoren des reflektierten Lichts. Um die reflektierenden Heliostatpunkte zu finden, sind alle \vec{r} mit den

zugehörigen \vec{V}_{HC} zu vergleichen. Sollten diese annähernd gleich sein, so bedeutet dies, dass das vom Target ausgehende Licht in die Kamera reflektiert wird und somit im von ihr aufgenommenen Bild sichtbar ist.

Zum Vergleich beider Vektoren wird der Winkel zwischen ihnen berechnet. Ist dieser kleiner als ein bestimmter Grenzwert, so kann davon ausgegangen werden, dass die Vektoren annähernd gleich sind und der entsprechende Heliostatpunkt im Bereich der Reflexion liegt.

In einer vereinfachten Variante kann dieser Grenzwert durch den User vorgegeben werden. Allerdings basiert dieser auf einigen Faktoren, z.B. Targetgröße, Kameragröße und Positionen von Target und Kamera gegenüber dem Heliostaten. Eine abstrakte Festlegung des Grenzwerts führt daher zu grob von der Wirklichkeit abweichenden Ergebnissen. Er sollte deshalb für jeden Standpunkt der Kamera (d.h. für jedes Bild) neu berechnet werden.

Bei Festlegung des Grenzwerts sind folgende Überlegungen anzustellen: Sowohl Kamera als auch Target sind in der Praxis keine Punkte, sondern haben eine Fläche. Dadurch ergeben sich pro Heliostatpunkt gewissermaßen unendlich viele Vektoren des reflektierten Lichts, deren Richtungen abhängig von der Größe der Targetfläche sind. Da die Kamera ebenfalls als Fläche interpretiert werden kann, gibt es unendlich viele Vektoren, die von Heliostatpunkt zur Kamera zeigen. Sowohl Kamera- als auch Targetflächen werden als Kreise angesehen.

In Abb. 4.4 ist dies vereinfacht dargestellt. Die beiden roten Lichtkegel sind das ein- und ausfallende Licht des Targets. Diese zeigen ebenso wie der blaue Sichtkegel der Kamera auf einen Heliostatpunkt. ϵ ist der zu überprüfende Winkel. Damit eine Targetreflexion für die Kamera sichtbar ist, darf ϵ nicht größer als die Summe aus dem Öffnungswinkel γ des Lichtkegels und dem Öffnungswinkel δ des Kamerasichtkegels sein. Vereinfacht bedeutet das, dass Sichtkegel und ausfallender Lichtkegel wie in gezeigtem Beispiel teilweise ineinander liegen müssen, damit eine Targetreflexion im Bild zu sehen ist. Es ist zu beachten, dass γ und δ abhängig vom Abstand des Targets bzw. der Kamera vom Heliostaten sowie deren angenommener Flächen sind.

Entsprechend der Kameraposition (vor allem deren Distanz zum Heliostaten) und der vorzugebenden Größe der Kreisradien von Kamera- und Targetflächen sowie der Dichte der Heliostatpunkte werden einem Reflexionsbereich unterschiedlich viele Heliostatpunkte zugeordnet. In der Regel ergibt sich ein runder bzw. zyklodischer Bereich auf dem Heliostat.

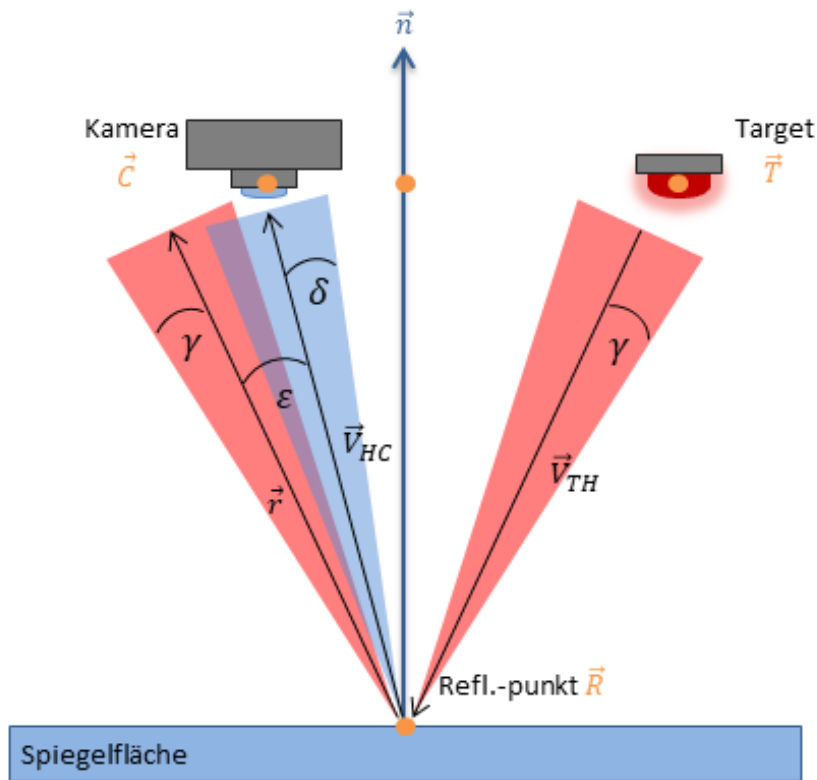


Abbildung 4.4: Schematische Seitenansicht der Grenzwertfestlegung für die maximale Winkelabweichung zwischen dem Vektor des reflektierenden Lichts und dem zur Kamera zeigenden Vektor (Abstände zwischen Kamera, Target und Heliostat sowie Öffnungswinkel der Kegel nicht verhältnismäßig)

Abb. 4.5(a) zeigt beispielhaft den gesamten Sichtbereich der Kamera. Die weiße Punktwolke stellt die parabolisch geformte Heliostatoberfläche dar. Die Kamera ist frontal auf den Heliostaten ausgerichtet, die Bildebene ist parallel zur Heliostatmitte, von der sich das Kameraprojektionszentrum in einer Entfernung von 270 m befindet. Zusätzlich ist die Kamera um 45 um ihre z-Achse gekippt. Die Targets befinden sich aus Kameraperspektive links (grün), rechts (blau) und über ihr (rot). Der Abstand zum Projektionszentrum ist für alle Targets gleich (30 cm). Der Heliostat hat eine Größe von knapp 7 m × 7 m und füllt dementsprechend nur einen geringen Anteil des Kamerasischtbereichs aus. Der in diesem Beispiel gezeigte Heliostat hat zur Vereinfachung eine angenommene Idealform.

Targetreflexionen auf dem Heliostaten werden erst durch ein Vergrößern des Bildausschnitts, in dem der Heliostat liegt, sichtbar (Abb. 4.5(b)). Der Heliostatmittelpunkt befindet sich genau zwischen blauer und grüner Reflexion. Die horizontale und die vertikale Linie teilen den Sichtbereich in vier gleich große Bereiche und schneiden sich in der Bildmitte. Es wäre zu erwarten, dass sich der Heliostatmittelpunkt

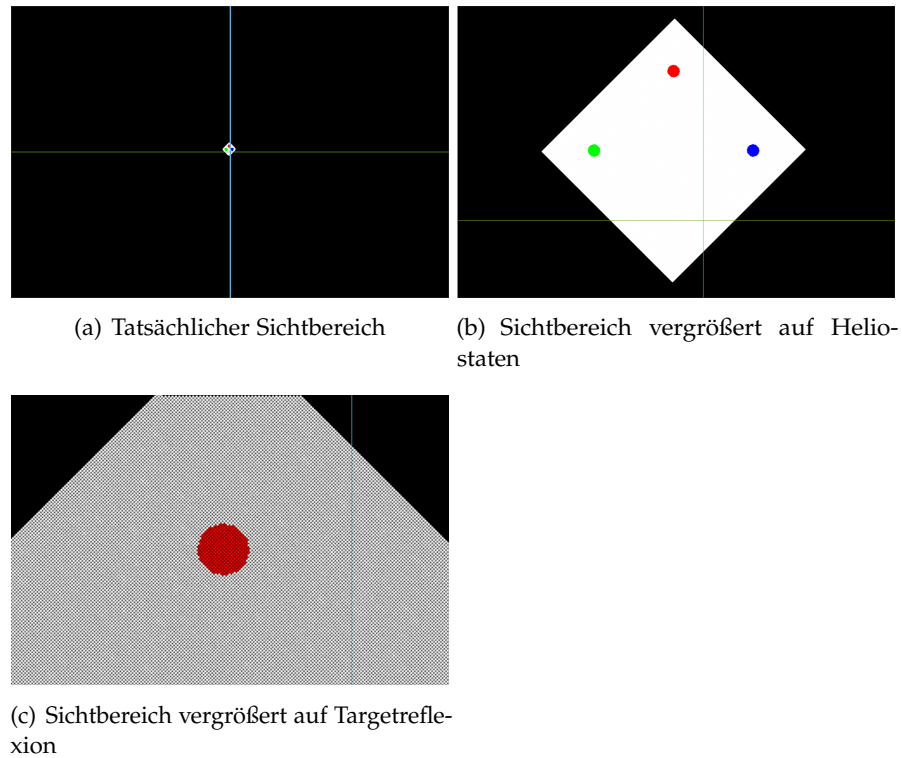


Abbildung 4.5: Sicht der Kamera auf den Heliostaten als Punktwolke

im Mittelpunkt des Bildes befindet, bzw. blaue und grüne Reflexion auf der horizontalen, und rote Reflexion auf der vertikalen Linie, mit je gleichem Abstand zum Schnittpunkt.

Dies hat den Grund, dass die Berechnung des Kamerasichtbereichs auf realen Kameradaten basiert. Im Normalfall weichen bei einer Kamera Bildmittelpunkt und Bildhauptpunkt (Schnittpunkt der Bildebene mit dem Lot des Projektionszentrums durch diese) minimal voneinander ab, wodurch sich eine leichte Verschiebung des Bildinhalts ergibt.

In Abb. 4.5(c) wird sichtbar, dass es sich bei der Heliostatoberfläche um eine Punktwolke handelt. Dort ist zwischen den Heliostatpunkten die schwarze Umgebung zu sehen. Die Target-reflektierenden Heliostatpunkte bilden je einen kreisförmigen Bereich. Da sich alle Reflexionen im gleichen Abstand zur Heliostatmitte befinden, ist deren Form und Größe gleich.

4.2.6 Bildgenerierung

Der im Sichtfeld der Kamera liegende Teil des Objektraums wird als Bild gespeichert. Das verwendete Bildformat gleicht dem eines Digitalbilds einer realen Kamera, bestehend aus drei Kanälen, je ein Kanal

für die Farben Rot, Grün und Blau. Die Bildmaße (Bildbreite und -höhe) werden aus der inneren Orientierung der Kamera übernommen (siehe Kapitel 4.2.4). Das Bild wird durch eine dreidimensionale Matrix dargestellt. Die ersten beiden Dimensionen entsprechen Höhe und Breite des Bilds; jedes Matrixelement entspricht dem Pixel an gleicher Position. Die dritte Dimension besteht aus den drei Farbkanälen. Es werden dadurch jedem Pixel drei Werte zugewiesen, die den Farbwertanteil ihres Kanals angeben.

Zunächst ist die Bildmatrix mit Nullen gefüllt, das Bild ist schwarz. Wie in Kapitel 4.2.4 beschrieben, sind die Bildkoordinaten aller für die Kamera sichtbaren Heliostatpunkte nun bekannt. Jeder Eintrag der Kanalmatrixen, dessen Position den gerundeten Koordinaten eines Heliostatpunkts entspricht, wird dahingehend geändert, dass jenes Pixel im Bild nicht mehr schwarz ist, sondern die Farbe des Heliostaten (zunächst weiß) annimmt. Das Ergebnis ist eine zusammenhängende weiße Pixelfläche.

Die berechnete Pixelfläche kann jedoch Lücken aufweisen, falls sich die Kamera so nahe am Heliostat befindet, dass zwei benachbarte Heliostatpunkte weder im gleichen noch in zwei benachbarten Pixeln liegen. Dies führt dazu, dass innerhalb der den Heliostaten darstellende Pixelfläche eine entsprechende Vielzahl an Pixeln auftritt, die nicht dem Heliostat zugeordnet werden. Es entstehen streifenartige Lücken.

Das Auftreten solcher Lücken wird durch eine einfache Methode ermittelt. Zunächst werden die Bildkoordinaten des Schwerpunkts der Heliostatfläche durch Mittelwertbildung über alle Heliostatflächenpixelkoordinaten bestimmt und gerundet. Von diesem Punkt ausgehend, werden nun alle Pixel in horizontaler sowie in vertikaler Richtung vom ersten bis zum letzten zur Heliostatfläche gehörendem Pixel betrachtet. Sollte in einer oder mehrerer Richtungen die Anzahl der Heliostatpixel nicht mit der Anzahl der betrachteten Pixel übereinstimmen, so ist mindestens eine Lücke existent.

Um die Lücken in der Heliostatfläche zu schließen, wird eine morphologische Operation aus der digitalen Bildverarbeitung, das sogenannte *Closing* eingesetzt. Zunächst muss hierfür ein Strukturelement in seiner Form und Größe vorgegeben werden. Dessen Größe wird basierend auf der Lückengröße dynamisch angepasst, da es breiter als die Lücken sein muss. Als Form wird ein Quadrat verwendet. Durch eine Dilatation mit jenem Strukturelement und eine anschließende Erosion mit selbigem, werden die Lücken geschlossen.

Anschließend sollen die Targetreflexionsbereiche entsprechend der jeweiligen Targetfarbe koloriert werden. Dafür wird basierend auf

den Pixelkoordinaten der Heliostatpunkte eines Reflexionsbereich eine Maske erzeugt. Beim Auftreten von Lücken wird auf die Maske ebenfalls ein Closing angewendet. Für die Färbung der Targetreflexionsbereiche gibt es die zwei folgenden Möglichkeiten.

Bei der einfachen Variante werden auf allen Bildkanälen die Werte der durch die Maske gewählten Pixel durch den jeweiligen Wert des Targetfarbvektors ersetzt (erster Vektoreintrag für ersten Bildkanal usw.). Dadurch entsteht für jedes Target ein homogener Reflexionsbereich mit gleicher Farbe.

Eine zweite Methode färbt Targetreflexionsbereiche derart, dass sie realen LED-Reflexionen in einem Spiegel stärker ähneln (siehe dazu Kapitel 6.3). Die Farbsättigung ist in deren Zentrum meist sehr gering und nimmt erst zum Rand hin zu, wodurch der innerste Bereich weiß erscheint. Auch die Intensität ändert sich bei realen Reflexionen innerhalb eines Reflexionsbereichs. Diese ist im Zentrum sehr hoch und fällt nach außen hin leicht ab. Sättigung und Intensität eines Pixels des Reflexionsbereichs sind folglich abhängig von seinem Abstand zum Reflexionszentrum und müssen für eine realistische Darstellung diesem entsprechend angepasst werden.

Dazu wird der Farbvektor des Targets vom RGB- in den HSI-Farbraum transformiert. Eine Farbe ist darin nicht über die anteilige Addition der Grundfarben definiert, sondern setzt sich aus Farbwert, Farbsättigung und Lichtintensität zusammen. Der zweite (Sättigung) und dritte Vektoreintrag (Intensität) des transformierten Farbvektors variiert für jedes Pixel. Durch Mittelwertbildung der Koordinaten der Pixel des Reflexionsbereichs wird dessen Zentrum berechnet und der Abstand jedes Pixels zu diesem bestimmt und auf einen Bereich von 0 bis 1 normiert.

Für Sättigung und Intensität ist je ein Wertebereich vorzugeben. Der festgelegte Sättigungswertebereich reicht von 0,1 im Reflexionszentrum bis 1 (entspricht 100% Sättigung, d.h. reiner Farbe) am Reflexionsrand. Der Bereich von 0 (0% Sättigung) bis 0,1 wird nicht berücksichtigt, um die Reflexionszentren nicht weiß, sondern nur annähernd weiß zu färben. Die Intensitätswerte liegen zwischen 0,5 am Rand und 1 (entspricht 100% Helligkeit) im Zentrum.

Der in ein RGB-Bild umgewandelte Sichtbereich der Kamera ist in Abb. 4.6(a) zu sehen. Ein Unterschied zwischen diesem Bild und dem tatsächlichen Sichtbereich der Kamera (Abb. 4.5(a)) ist kaum zu erkennen. Dieser zeigt sich erst beim Vergleich von Abb. 4.5(b) und Abb. 4.6(b). Zu sehen ist einerseits die gewollte Farbänderung der Targetreflexionen. Zweitens ist eine Formänderung der Targetreflexionen

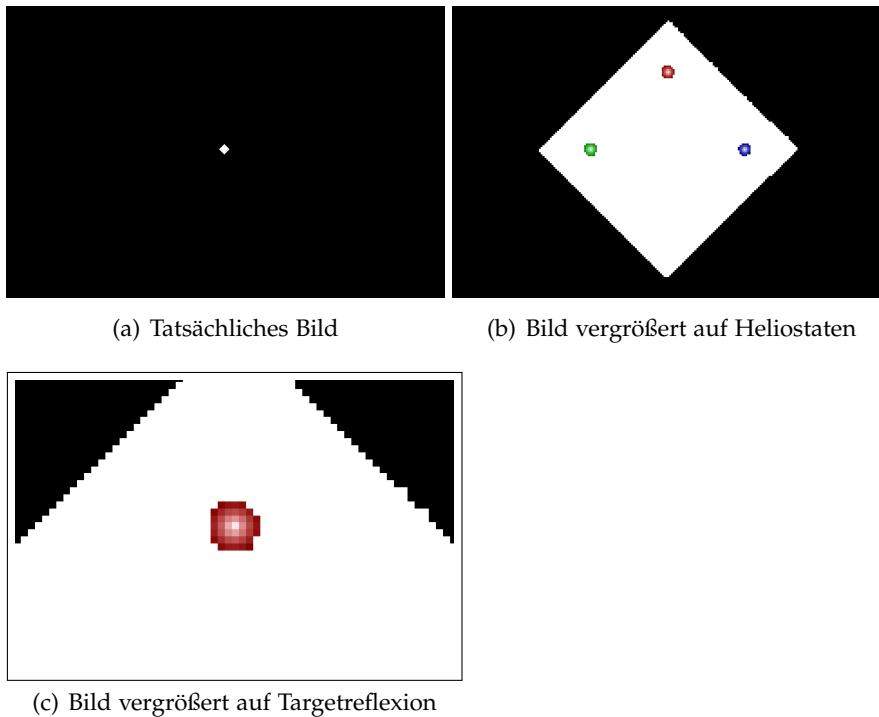


Abbildung 4.6: Sicht der Kamera auf den Heliostaten als RGB-Bild

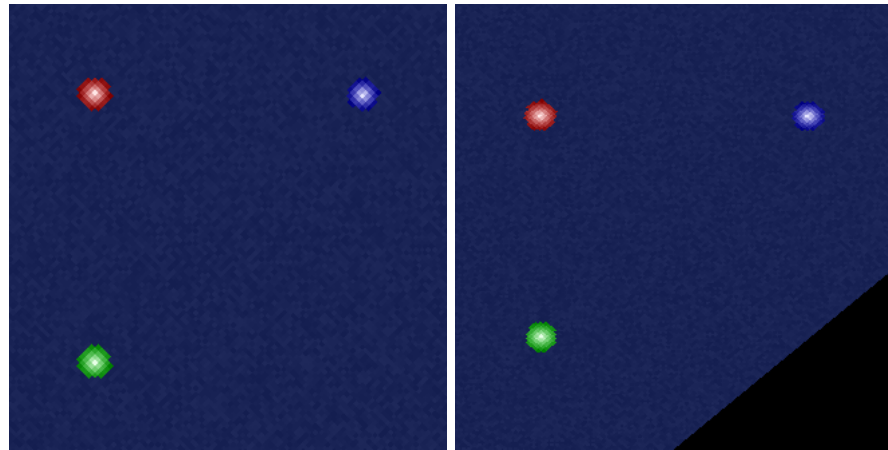
zu beobachten, welche aufgrund der begrenzten Kameraauflösung „eckiger“ erscheinen. Noch deutlicher ist dies in Abb. 4.6(c) zu sehen. Die leicht asymmetrische Form dieser Targetreflexion ist auf die Verzeichnung der Kamera zurückzuführen.

Vor dem nächsten Programmabschnitt - der Orthobildgenerierung - werden alle weißen, den Heliostaten darstellenden Pixel in einem dunklen blau eingefärbt, da in der Praxis meist der sich reflektierende Himmel im Heliostaten zu sehen ist. Die genauen Farbtöne der einzelnen Pixel werden zufällig festgelegt und unterscheiden sich daher leicht voneinander, damit keine homogene Pixelfläche entsteht, da dies die spätere Detektion der Reflexionen zu einfach machen würde, und dies nicht den realen Bedingungen entspricht.

4.2.7 Orthobildgenerierung

Um aus den simulierten bzw. realen Aufnahmen Rückschlüsse über die Geometrie einzelner Heliostaten ziehen zu können, müssen die Bilder zunächst entzerrt, gedreht und zugeschnitten werden. Das resultierende Orthobild enthält ausschließlich den jeweiligen Heliostat, so dass jedes Pixel einem Heliostatpunkt entspricht.

Durch diese Kopplung von Objektkoordinaten und Pixeln im Ort-



(a) Orthobild eines sich vollständig im Eingangsbild befindlichen Heliostaten (b) Orthobild eines sich teilweise im Eingangsbild befindlichen Heliostaten

Abbildung 4.7: Orthobilder

hobild können einem Reflexionsbereich auf dem Heliostaten sofort die entsprechenden Koordinaten im Objektkoordinatensystem zugeordnet werden, wodurch die Normalenvektoren an diesem Ort bestimmt werden können.

Um das Orthobild zu generieren, müssen die Pixelkoordinaten der im Ursprungsbild sichtbaren Heliostatpunkte bekannt sein bzw. berechnet werden (siehe Abschnitt 4.2.4). Die Maße des Orthobilds ergeben sich aus der Anzahl der Heliostatpunkte in Längs- und Querrichtung.

Jedes Pixel des Orthobilds, dessen zugehöriger Heliostatpunkt im Ursprungsbild zu sehen ist (Zuordnung über Kennziffer), wird mit der passenden Farbinformation gefüllt. Dazu werden die Werte der drei Farbkanaäle jenes Pixels übernommen, in dem der Heliostatpunkt im Ursprungsbild liegt. Alle Orthobildpixel, die nicht mit Farbinformationen gefüllt werden, bleiben schwarz. Diese Teile des Heliostaten sind im Eingangsbild nicht zu sehen. In Abb. 4.7 ist dies dargestellt. Abb. 4.7(a) zeigt das Orthobild eines Heliostaten, der im ursprünglich aufgenommenen Bild vollständig zu sehen war. In Abb. 4.7(b) ist ein Orthobild zu sehen, welches aus einem Bild erzeugt wurde, in dem sich der Heliostat am Bildrand befindet und ein kleiner Teil davon außerhalb des Bilds liegt. Der schwarze Bereich im Orthobild ist dieser fehlende Teil des Heliostaten im Ursprungsbild.

4.2.8 Detektion der Targetreflexionen auf dem Heliostaten

Im nächsten Schritt werden in den zuvor erstellten Orthobildern diejenigen Bereiche des Heliostaten detektiert, auf denen das von den

LEDs ausgestrahlte Licht reflektiert wird. Hierzu werden Methoden der Bildverarbeitung angewandt. Dies ist sowohl für die in der Simulation erzeugten Bilder als auch für digitale Bilder echter Heliostaten durchführbar.

Die anfängliche Idee zur Detektion von Targetreflexionen im Orthobild war, die Farbe der Targets den einzelnen Kanälen des RGB-Orthobilds anzupassen. So wäre bspw. auf dem roten Farbkanal mit Wertebereich von 0 bis 1 die Reflexion des roten Targets an der Stelle, an der die Pixel Werte nahe des Maximums haben. Beim sogenannten *Thresholding* wird ein Schwellenwert berechnet, über den alle Pixel basieren auf ihren Werten in zwei Kategorien (reflektierend und nicht-reflektierend) eingeteilt werden. Für jeden Farbkanal entsteht so ein Binärbild. An jenen Stellen in den Binärbildern, an denen Pixel erstgenannten Kategorie zugeordnet wurden, können Normalenvektoren bestimmt werden. Dieses Verfahren erwies sich jedoch vor allem für reale Aufnahmen als nicht zielführend.

Die Pixel eines Targetreflexionsbereichs erscheinen im Vergleich zu ihrer dunkleren Umgebung (Himmel) vor allem in ihrem Zentrum besonders hell und ermöglichen damit eine Detektion basierend auf der Helligkeit bzw. Intensität. Das Orthobild des Heliostaten wird dafür zunächst in den HSI-Farbraum transformiert. Für den Intensitätskanal (dritter Kanal des HSI-Bilds) wird ein Schwellenwert festgelegt. Dieser ist so niedrig angesetzt, dass bestenfalls alle Targetreflexionsbereiche detektiert werden. Diverse Fehldetektionen werden in Kauf genommen und in einem zweiten Schritt aussortiert. Es handelt sich dabei zumeist um Reflexionen des Sonnenlichts an den Kanten der einzelnen Heliostatpaneele.

Dazu wird für jeden detektierten Bereich die mittlere Sättigung (zweiter Kanal des HSI-Bilds) berechnet. Für Reflexionsbereiche der Targets ist diese aufgrund der LED-Farbe höher als für Reflexionen des (weißen) Sonnenlichts oder sonstigen fehlzugeordneten Bereichen des Bilds. Liegt die mittlere Sättigung über einem ebenfalls vorzugebenden Grenzwert (basiert auf Erfahrungswerten), wird der entsprechende Reflexionsbereich als Reflexion eines Targets angesehen.

Anspruchsvoller ist dagegen die Bestimmung der Reflexionsfarbe bzw. die Zuordnung der Reflexion zu einem Target. Oftmals kommt es vor, dass Reflexionsbereiche (sowohl eines als auch mehrerer Targets) teilweise sehr eng aneinander liegen. Dadurch können sie zunächst irrtümlich als ein zusammenhängender Reflexionsbereich interpretiert werden. Um grobe Fehler bei der Normalenvektorberechnung zu verhindern, muss eine solche Vereinigung zweier Reflexionen unterschiedlicher Targets unbedingt verhindert werden.

Dafür werden die Farbwerte (erster Kanal des HSI-Bilds) aller Pixel eines Reflexionsbereichs miteinander verglichen. Übersteigt die Abweichung der Farbwerte zweier Pixel zueinander einen vorzugebenen Grenzwert, wird der ursprüngliche Reflexionsbereich zweigeteilt. Die Zuordnung der einzelnen Pixel erfolgt über *kmeans-Clustering* basierend auf den Farbwerten. Es wird so lange iteriert, bis kein Reflexionsbereich weiter aufgeteilt wird.

Um einen Reflexionsbereich letztendlich einem Targets zuzuordnen, werden die Farbwerte aller zugehörigen Pixel auf jedem Kanal des RGB-Bilds gemittelt. Von dem daraus resultierenden Farbvektor wird der euklidische Abstand zu den Farbvektoren der Targets berechnet. Die Zuordnung des Reflexionsbereichs folgt zu dem Target, zu dessen Farbvektor der geringste Abstand besteht.

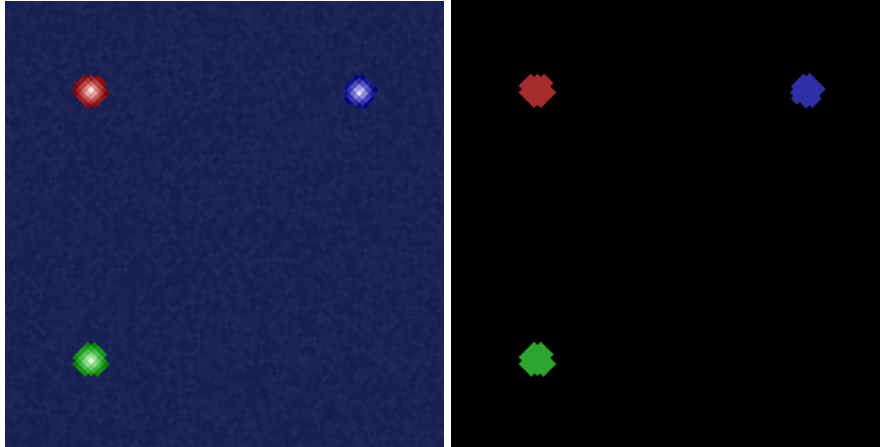
Dieses Verfahren funktioniert sowohl für reale als auch simulierte Bilder. In Abb. 4.8 ist dies zu sehen. Rechts in der oberen Zeile ist ein Orthobild aus dem Simulationsprogramm sichtbar, links sind die detektierten Targetreflexionsbereiche. In Abb. 4.8(c) und Abb. 4.8(e) befinden sich jeweils Aufnahmen (keine Orthobilder) von einem Heliostaten aus dem ersten Praxisversuch (siehe Kapitel 6.3). In Abb. 4.8(d) und Abb. 4.8(f) sind die zugehörigen detektierten Reflexionsbereiche zu sehen. Die Bilder zeugen davon, dass dieses Verfahren relativ robust ist, im unteren Bild gibt es jedoch eine Fehldetektion (rote Markierung) in der Mitte zwischen den Spiegelflächen.

Werden Reflexionsdetektionen in mehreren Orthobildern des gleichen Heliostaten durchgeführt, werden die gefundenen Reflexionen aller Bilder in einem Bild (Größe entspricht der des Orthobilds und somit den Heliostatpunkten) zusammengefasst, um die Reflexionsverteilung auf dem Heliostaten besser beurteilen zu können.

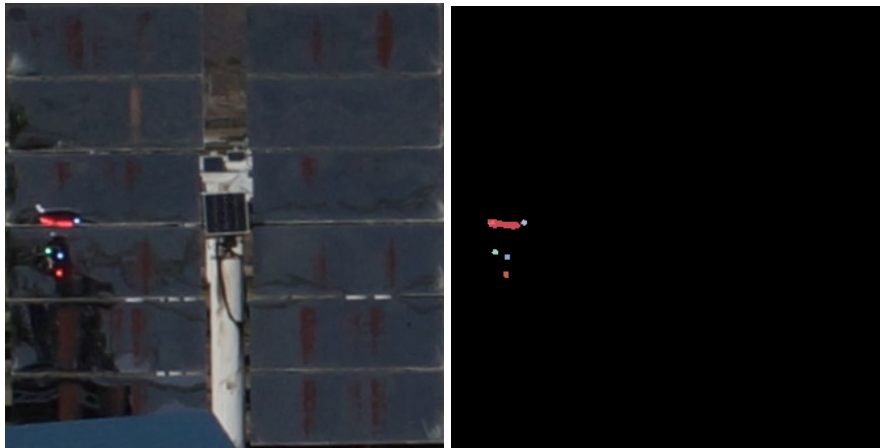
4.2.9 *Qualität des Bildverbands*

Nach Detektion der Targetreflexionen in allen Bildern eines Bildverbands besteht der nächste Schritt aus einer Beurteilung über deren Anzahl und Verteilung auf dem Heliostaten. Aussagen über dessen Oberflächenform und Ausrichtung können nur getroffen werden, falls Information in Form von Normalenvektoren über den gesamten Heliostaten gleichmäßig verteilt und mit ausreichender Dichte vorliegt.

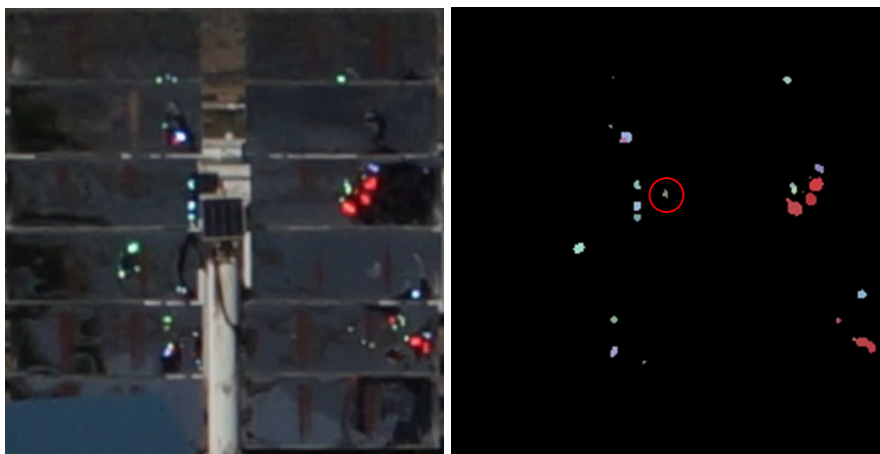
Für die Auswertung vorzugeben sind drei Eingangsparameter. Das Bild der kombinierten Reflexionen wird in eine durch den ersten Parameter festgelegte Anzahl rechteckiger Bereiche gleicher Größe



(a) Orthobild aus Simulationsprogramm (b) Detektierte Targetreflexionsbereiche im simulierten Orthobild



(c) Bild eines realen Heliostaten (d) Detektierte Targetreflexionsbereiche im realen Bild



(e) Bild eines realen Heliostaten (f) Detektierte Targetreflexionsbereiche im realen Bild

Abbildung 4.8: Bilder des gesamten Heliostaten mit Targetreflexionen (linke Spalte), detektierte Targetreflexionsbereiche (rechte Spalte)

unterteilt. Je nach dem, ob Normalenvektoren für den gesamten Reflexionsbereich oder nur für das Reflexionszentrum bestimmt werden sollen, wird die Anzahl der Reflexionspixel bzw. Reflexionszentren (allgemein: Positionen zur Normalenvektorbestimmung) in jedem Bereich bestimmt. Über einen Grenzwert (zweiter Eingangsparameter) werden die Bereiche basierend auf der darin ermittelten Anzahl der Positionen zur Normalenvektorbestimmung in die zwei Kategorien "voll"(oberhalb des Grenzwerts) und "leer"(unterhalb des Grenzwerts) eingeteilt.

Um die Gesamtverteilung zu beurteilen, wird der Anteil voller Teilbereiche an der Gesamtanzahl berechnet. Eine gute Verteilung wird angenommen, falls der Anteil bei über 90% liegt. Beinhalten weniger als 50% der Teilbereiche eine ausreichende Anzahl an Positionen zur Normalenvektorbestimmung, ist die Verteilung ungenügend.

Bei passender Wahl des Grenzwertparameters liegt der Anteil meist zwischen 50% und 90%. In diesem Fall ist die Verteilung akzeptabel, wenn sich in der Nachbarschaft jedes leeren Teilbereichs mindestens ein voller Bereich befindet. Die Größe der Nachbarschaft wird durch den dritten Eingangsparameter definiert (Betrachtung der 8 bzw. 16 nächsten Nachbarbereiche). Sobald ein leerer Bereich mit ausschließlich leeren Nachbarbereichen gefunden wird, gilt die Verteilung als ungenügend.

Es ist zu beachten, dass die Eingangsparameter für Gesamtanzahl der Teilbereiche und Nachbarschaftsgröße aufeinander abgestimmt werden. Bewährt hat sich eine Anzahl von 25 Teilbereichen (je 5 in die Breite und Höhe) bei einer Nachbarschaftsgröße von 1 (8 nächste Nachbarn). Auch der Grenzwert zur Beurteilung der Anzahl an Positionen zur Normalenvektorbestimmung pro Teilbereich muss entsprechend der gewählten Methode (Bestimmung der Normalenvektoren im Zentrum oder im gesamten Reflexionsbereich) angepasst werden.

Neben der auf den Parametern basierenden Bewertung der Verteilung wird für den User zusätzlich eine Grafik angezeigt, welche die Verteilung visualisiert. In Abb. 4.9 sind drei Beispiele für eine perfekte Verteilung (obere Zeile), eine annehmbare Verteilung (mittlere Zeile) sowie eine schlechte Verteilung (untere Zeile) zu sehen. Die Färbung der einzelnen Bereiche gibt Auskunft über die Anzahl der darin befindlichen Targetreflexionen (siehe Skala am rechten Rand). Da im oberen Fall eine Bereiche gleich viele Reflexionen enthalten, sind die Bereiche neutral gefärbt.

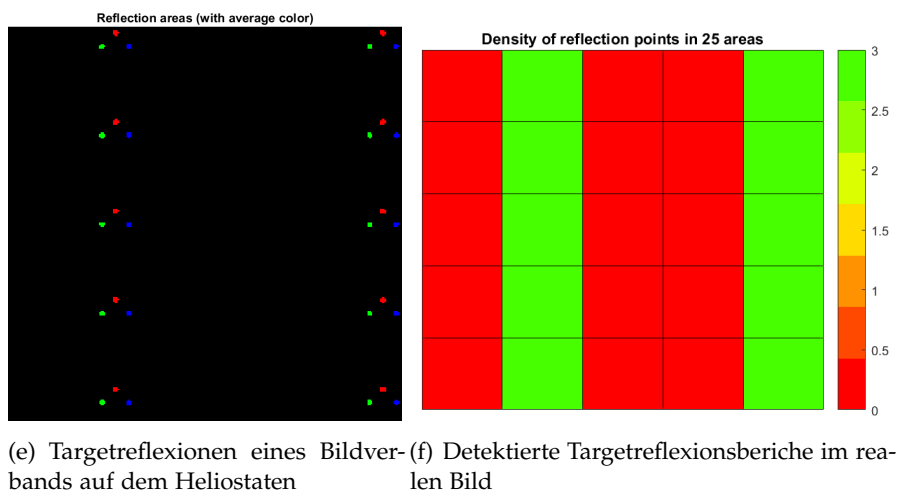
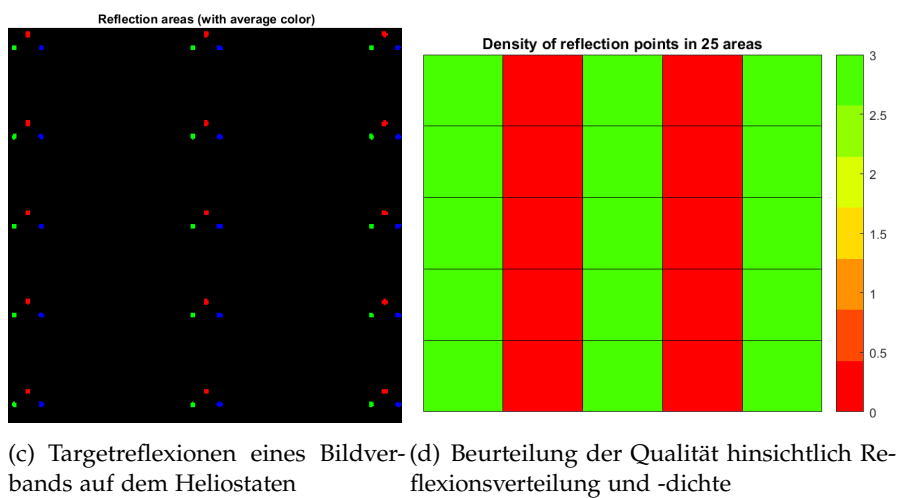
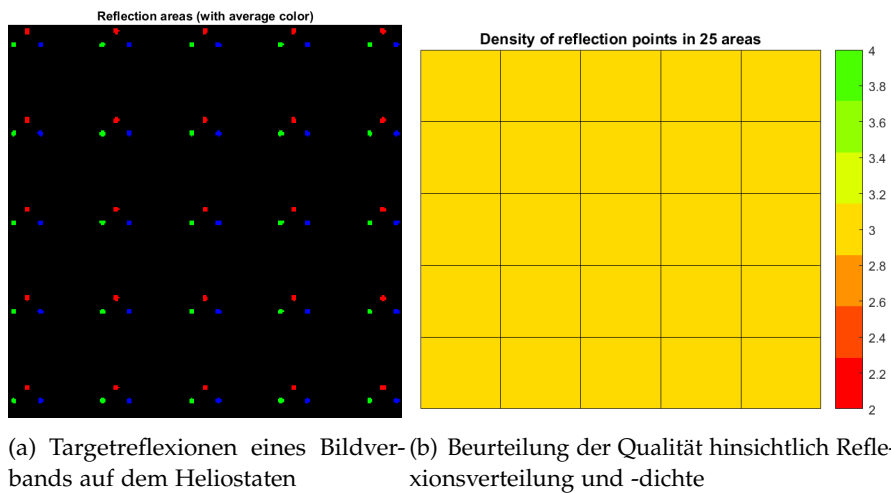


Abbildung 4.9: Beispiele für die Bewertung der Reflexionsverteilung auf dem Heliostaten: Perfekte Verteilung (obere Zeile), ausreichende Verteilung (mittlere Zeile), schlechte Verteilung (untere Zeile)

4.2.10 Bestimmung der Heliostatoberflächenform und Heliostatorientierung

Ist die Verteilung der Targetreflexionen ausreichend, werden an diesen Stellen die Normalenvektoren des Heliostaten bestimmt. Dabei ist zu unterscheiden, ob nur der Normalenvektor im Reflexionszentrum oder alle Normalenvektoren der im Reflexionsbereich liegenden Heliostatpunkte berechnet werden sollen. Letzteres bedeutet eine Vervielfältigung an Information pro Reflexion, allerdings ist zu beachten, dass die Abweichung zwischen bestimmtem und tatsächlichem Normalenvektor zum Rand der Reflexion hin zunimmt.

Die Berechnung findet über die Reflexionsgleichung (3) statt. \vec{n} ist der Normalenvektor bzw. sind die Normalenvektoren der Heliostatpunkte innerhalb eines Reflexionsbereichs. \vec{V}_{HK} ist der Vektor zwischen jenen Heliostatpunkten und Kamera, \vec{V}_{TH} sind die Vektoren zwischen den Heliostatpunkten und dem Target.

Die berechneten und idealen bzw. aus Referenzmessungen bekannten Normalenvektoren werden anschließend miteinander verglichen. Als Vergleichsgröße dient der Winkel zwischen den Vektoren. Falls ein Vergleich der Normalenvektoren der Reflexionszentren (und nicht der gesamten Reflexionsfläche) stattfinden soll, müssen die idealen Normalenvektoren erst interpoliert werden, da das Zentrum der Reflexionsfläche meist nicht genau in der Mitte eines Pixels liegt. Auf diese Weise kann geprüft werden, wie gut die Normalenvektoren für einzelne Heliostatpunkte reproduziert wurden.

Im Praxisfall können hier die Abweichungen zwischen berechneten und idealen Normalenvektoren, d.h. zwischen Ist- und Sollwerten bestimmt werden, um daraus Rückschlüsse auf die Geometrie der Spiegelfläche ziehen zu können.

Die Gesamtorientierung eines Heliostaten ergibt sich durch Mittelwertbildung aller seiner Oberflächennormalen. Allerdings wird die gesamte Heliostatspiegelfläche durch eine Befliegung nur in Ausnahmefällen an jeder Stelle durch eine Targetreflexion abgedeckt. Daher muss der Orientierungsvektor in der Regel aus weit weniger Normalenvektoren bestimmt werden. Dazu müssen diese allerdings gleichmäßig über den Heliostaten verteilt sein.

4.3 ERGEBNISSE

Im folgenden Kapitel sollen die Ergebnisse der einzelnen Programabschnitte dargestellt und eingeordnet bzw. miteinander verglichen

werden.

4.3.1 Form- und Größenänderungen der Targetreflexionen

Größe und Form einer Targetreflexion auf dem Heliostaten sind von mehreren Faktoren abhängig. Neben dem Abstand zwischen Kamera und Heliostat hat die Kameraauflösung darauf den größten Einfluss. Geringere Auswirkungen hat die Position der Targetreflexion auf deren Aussehen. Anhand der nachfolgenden Abbildungen soll dies aufgezeigt werden. Allen Beispielen liegt ein fehlerfreier Heliostat zu Grunde. Zur Vereinfachung wird nur ein Target benutzt, welches sich an gleicher Position wie die Kamera befindet.

Kameraabstand zum Heliostat

Wie in Abb. 4.10 zu sehen ist, wird eine Targetreflexion mit zunehmendem Abstand des Targets und der Kamera zum Heliostaten größer. Die Größenänderung der Reflexion verhält sich jedoch nicht proportional zum Abstand, daher unterscheiden sich die in der linken Spalte von Abb. 4.10 gezeigten Orthobilder (aufgenommen mit verschiedenen Abständen) des gesamten Heliostaten kaum. Zur Verdeutlichung sind die Targetreflexionen in der rechten Abbildungsspalte nochmals in einem vergrößerten Ausschnitt zu sehen.

Die Pixelanzahl eines Targetreflexionsbereichs bleibt in den von der Kamera aufgenommenen RGB-Bildern unabhängig des Abstands zum Heliostaten in etwa gleich. Die mit zunehmendem Abstand ansteigende Zahl von Heliostatpunkten, welche das Target reflektieren, wird durch die ebenfalls zunehmende Größe des Bodenpixels ausgeglichen. Das bedeutet, dass einer u.U. großen Anzahl Heliostatpunkten, die dem Targetreflexionsbereich angehören, nur eine geringe Anzahl Pixel (verschiedenfarbig) aus dem RGB-Bild gegenübersteht. Damit lässt sich das Aussehen der Targetreflexionen erklären, deren Farbübergänge nicht fließend erscheinen.

Entgegen ursprünglicher Erwartungen werden Targetreflexionen mit zunehmendem Abstand zum Heliostaten nur langsam größer. Dies ändert sich erst, wenn sich Kamera und Target im Bereich nahe der doppelten Brennweite auf der optischen Achse des Heliostaten befinden. Dort werden selbst geringe Änderungen des Abstands anhand der Targetreflexionsgröße deutlich sichtbar. Dies ist in Abb. 4.11 beispielhaft dargestellt. Die Targetreflexion eines sich 10 m vor der dem Punkt der doppelten Brennweite befindlichen Targets (Abb. 4.11(a)) ist hinsichtlich deren Durchmessers nur etwa halb so groß wie die Targetreflexion eines Targets, welches sich 5 m weiter entfernt befindet

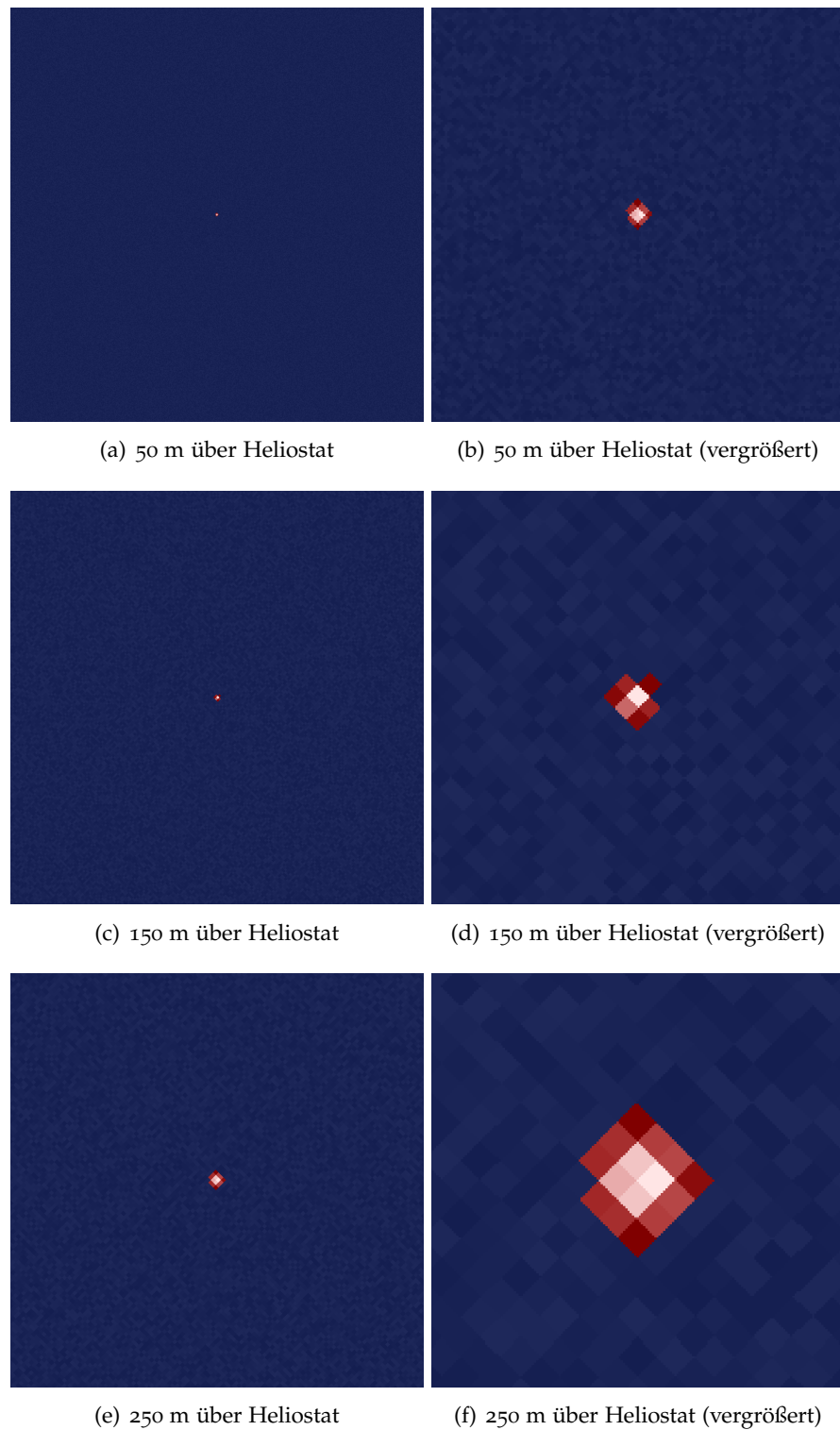


Abbildung 4.10: Orthobilder des gesamten Heliostaten mit Targetreflexion (linke Spalte), vergrößerter Ausschnitt des Heliostaten mit Targetreflexion (rechte Spalte)

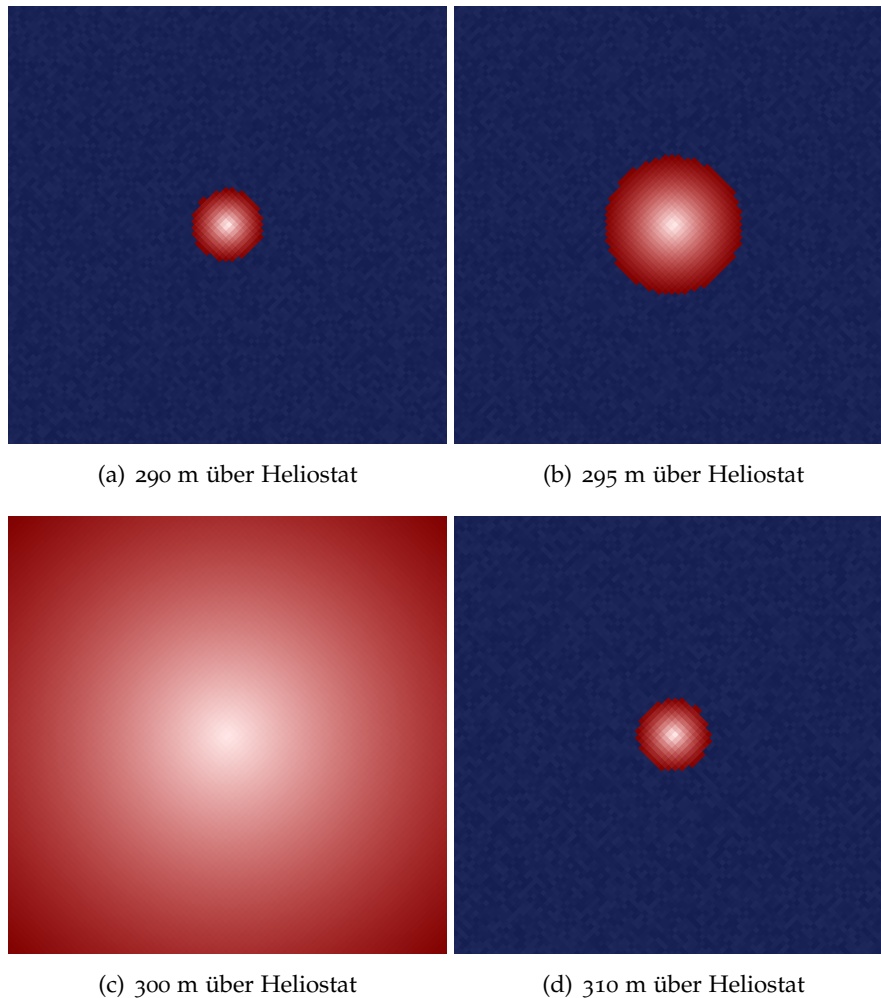
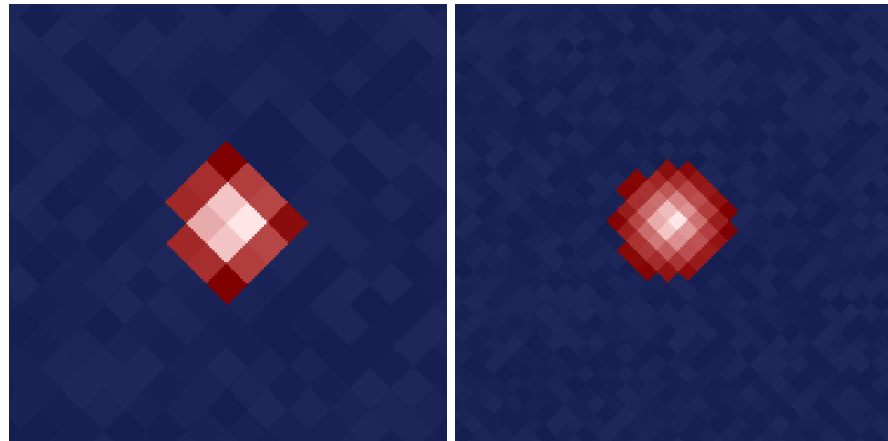


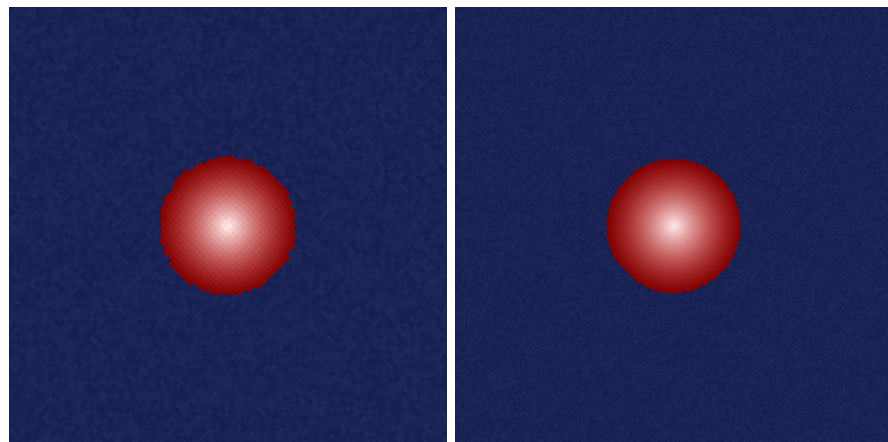
Abbildung 4.11: Orthobilder mit Targetreflexion; Kamerahöhe nahe der doppelten Heliostatbrennweite

(Abb. 4.11(b)).

Befinden sich Kamera und Target im Punkt der doppelten Heliostatbrennweite (in diesem Beispiel bei 300 m), so füllt die Targetreflexion den gesamten Heliostaten (Abb. 4.11(c)). Dadurch ist theoretisch die Normalenvektorbestimmung für jeden Punkt der Spiegeloberfläche möglich. Es ist allerdings zu beachten, dass sich in diesem Beispiel Kamera und Target an der selben Stelle befinden, was in Realität natürlich nicht möglich ist. Im Bereich hinter dem Punkt der doppelten Brennweite verhält sich Targetreflexionsgröße zu Abstand zum Punkt gleich wie im Bereich vor dem Punkt. Dementsprechend hat die Targetreflexion eines sich 310 m vom Heliostat entfernten Targets (Abb. 4.11(d)) die gleiche Größe wie die eines Targets mit 290 m Abstand (Abb. 4.11(a)).



(a) 250 m über Heliostat (vergrößert); tatsächliche Kamerakonstante (b) 250 m über Heliostat (vergrößert); doppelte Kamerakonstante



(c) 295 m über Heliostat; tatsächliche Kamerakonstante (d) 295 m über Heliostat; doppelte Kamerakonstante

Abbildung 4.12: Orthobilder aufgenommen aus gleicher Höhe mit unterschiedlichen Kamerakonstanten

Kameraauflösung

Die Kameraauflösung beeinflusst vor allem die Form der Targetreflexion im Orthobild. Deutlich zu sehen ist dies bei kleinen Targetreflexionsbereichen (Vergleich von Abb. 4.12(a) und Abb. 4.12(b)). Die Ursprungsbilder beider Orthobilder wurden von der gleichen Position aus aufgenommen, jedoch mit verschiedenen Kamerakonstanten. Durch die niedrigere Auflösung (linke Spalte von Abb. 4.12) besteht die Targetreflexion im Ursprungsbild aus weniger Pixeln und ist dadurch weniger detailliert hinsichtlich Färbung und Form. Bei zunehmendem Abstand der Kamera und des Targets zum Heliostaten lässt dieser Effekt an Einfluss (Vergleich von Abb. 4.12(c) und Abb. 4.12(d)).

Reflexionsposition

Die Position einer Targetreflexion auf dem Heliostaten hat nur einen sehr geringen Einfluss auf die Form. In der Heliostatmitte ist die Reflexion meist annähernd kreisförmig, in Richtung der Heliostatecken leicht verzerrt.

4.3.2 Auswirkung des Flugmusters auf Reflexionsverteilung

In diesem Abschnitt soll die von der Art des Flugmusters abhängige Targetreflexionsverteilung betrachtet werden. Dabei werden Reflexionen aus allen Aufnahmen (aller Aufnahmestandpunkte) der Kamera entlang eines Bewegungsmusters kombiniert dargestellt. Das linienförmige Flugmuster entlang der optischen Achse wird hierbei nicht berücksichtigt, da die Targetreflexionen in diesem Fall nur größer werden, während ihre Position gleich bleibt.

In Abb. 4.13 sind die Reflexionsverteilungen des mäander- und des spiralförmigen Flugmusters gegenübergestellt. Die Aufnahmestandpunkte auf dem Flugmuster befinden haben beiden Fällen den gleichen Abstand zum Heliostaten, deren Anzahl ist bei beiden Fällen in etwa gleich. Der Vorteil des Mäanders (Abb. 4.13(a)) wird dabei deutlich: Die Targetreflexionen sind in regelmäßigen Abständen zueinander auf dem Heliostaten verteilt. Bei der spiralförmigen Flugbahn dagegen sind die Reflexionen in der Mitte des Heliostaten bzw. im inneren der Spirale dichter als in den Außenbereichen (Abb. 4.13(b)).

Die Targetreflexionsdichte kann durch Verändern der Parameter, welche die Stützpunkte der Flugbahnen bzw. die Aufnahmestandpunkte definieren, angepasst werden. Nichtsdestotrotz lässt sich die Verteilung der Targetreflexionen bei einer mäanderförmigen Flugbahn besser kontrollieren und ist daher zu empfehlen.

Bei Betrachtung der automatischen Beurteilung der Reflexionsverteilungsdichte ergibt sich jedoch ein anderes Bild. Der Auswertalgorithmus bevorzugt die in Abb. 4.13(d) zu sehende Verteilung der Targetreflexionspositionen, da dort kaum Felder ohne Reflexion vorkommen. Die Reflexionsverteilung bei dem mäanderförmigen Flugmuster (Abb. 4.13(c)) wird aufgrund der vielen aneinandergrenzenden Felder ohne Targetreflexionen nur als ausreichend eingestuft. In diesem Fall ist somit eventuell eine Hinzunahme zusätzlicher Aufnahmestandpunkte empfehlenswert.

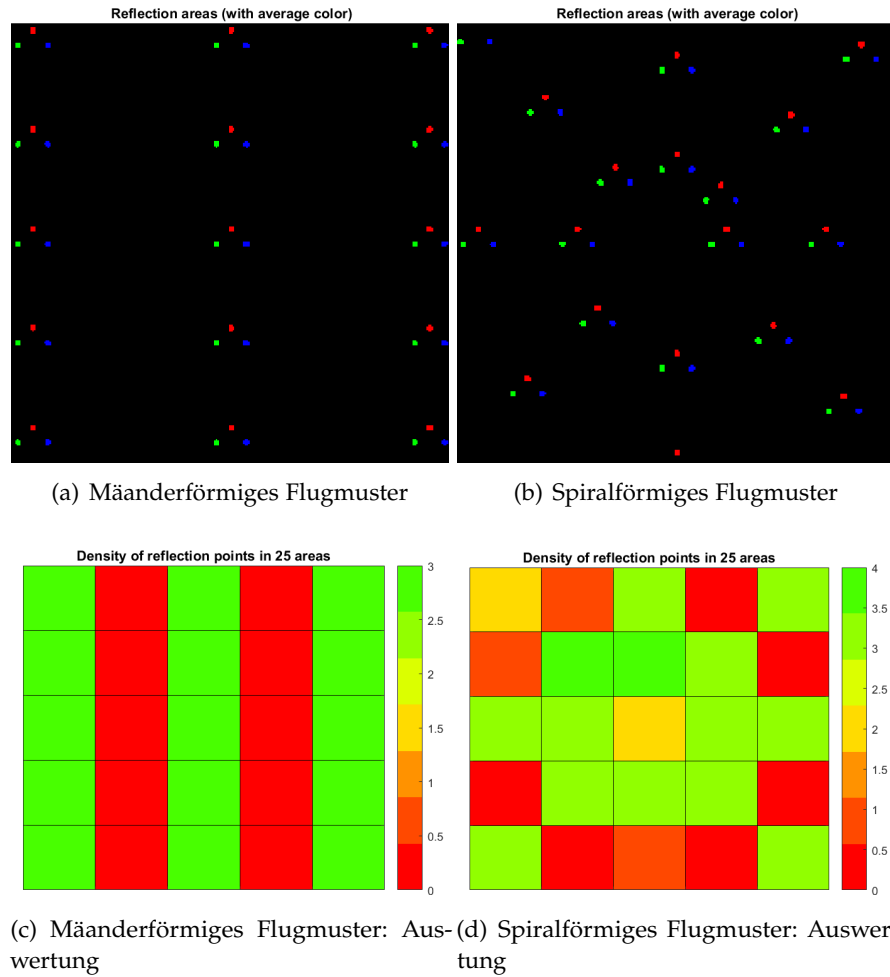


Abbildung 4.13: Oben: Verteilung von Targetreflexionen (rot, grün, blau) mehrerer Aufnahmestandpunkte auf einem Heliostaten (schwarz); unten: Automatische Auswertung der Reflexionsverteilung

4.3.3 Auswirkung der Heliostatoberflächenform auf Reflexionsverteilung

Die Position, an der eine Targetreflexion auf dem Heliostaten zu sehen ist, hängt auch von der Form der Spiegelfläche ab. Die Beispiele aus den vorherigen Abschnitten zeigen stets einen perfekten, fehlerlosen Heliostaten. In diesem Abschnitt soll der Unterschied zwischen der Reflexionsverteilung auf einem solchen idealen Heliostaten und einem bereits genau vermessenem, in Benutzung befindlichem Heliostaten aufgezeigt werden. Für diesen liegen sowohl die planmäßigen als auch die tatsächlichen Oberflächennormalenvektoren vor.

Ein idealer Heliostaten weist pro Target nur eine einzige Reflexion auf. In der Realität sind dagegen oft mehrere Reflexionen des selben Targets zu sehen, was auf eine Formabweichung der Spiegelfläche zurück zu führen ist. Abb. 4.14 zeigt dies deutlich. Während im idea-

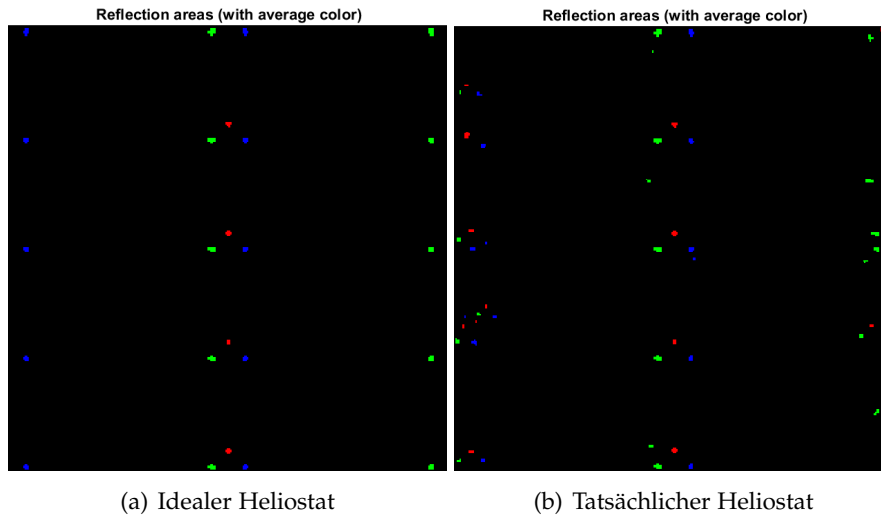


Abbildung 4.14: Verteilung von Targetreflexionen (rot, grün, blau) mehrerer Aufnahmestandpunkte auf einem idealen und tatsächlichen Heliostaten (schwarz)

len Heliostaten (Abb. 4.14(a)) pro Aufnahmestandpunkt je nur eine Targetreflexion jeder Farbe zu sehen ist (am Rand teilweise nicht alle drei Targets), werden Targets im realen Heliostaten (Abb. 4.14(b)) oft mehrmals reflektiert. Vor allem zum Rand und insbesondere zu den Ecken hin werden die Unterschiede zum idealen Heliostaten größer.

Diese durch teils starke Abweichungen von der Idealform hervorgerufenen Mehrfachreflexionen haben allerdings den Vorteil, dass zusätzliche Normalenvektoren an der Spiegeloberfläche bestimmt werden können.

In einem ersten Praxisversuch des Messverfahrens wurden diese Mehrfachreflexionen ebenfalls beobachtet. Details dazu finden sich erst im übernächsten Kapitel. Das nun folgende Kapitel handelt von der Fehlerabschätzung bei der Bestimmung der Normalenvektoren in den Targetreflexionsbereichen.

FEHLERABSCHÄTZUNG

5.1 FEHLERBEHAFTETE GRÖSSEN

Die in Abschnitt 3.2 erläuterten Eingangsgrößen zur Berechnung von Oberflächennormalen einer Heliostatspiegelfläche (Kameraposition, Targetposition, Targetreflexionsposition) unterliegen Fehlereinflüssen. Diese haben Auswirkung auf die Genauigkeit der berechneten Normalenvektoren. Im Folgenden werden diese Fehlereinflüsse auf die Eingangsgrößen betrachtet.

5.1.1 *Unsicherheit der Kamera- und Targetposition*

Die Positionsunsicherheit ist für Kamera und Targets gleich, da sich die relative Lage zwischen Kamera und Targets nicht ändert. Über eine Bündelblockausgleichung wird die Positionsunsicherheit bestimmt. Deren Größe ist vor allem von der Flughöhe bzw. Höhe der Kamera über Grund anhängig. Bei einer vorangegangenen Messung wurde die Positionsunsicherheit der Kamera auf 8 mm in horizontaler und 11 mm in vertikaler Richtung bei einer Flughöhe von 30 m angegeben ((Prah et al., 2013)). Es ist davon auszugehen, dass Vertikal- und Horizontalunsicherheit mit der Flughöhe skaliert. Bei einer für die Erfassung eines Heliostatenfelds beispielhaften Flughöhe von 100 m würden sich die Unsicherheiten in vertikaler und horizontaler Richtung in etwa verdreifachen.

5.1.2 *Unsicherheit der Targetreflexionsposition*

Die Unsicherheit der Position einer Targetreflexion auf dem Heliostaten unterliegt mehreren Einflüssen: Der Genauigkeit der Detektion einer Targetreflexion über Bildsegmentierung im Orthobild des Heliostaten, sowie der Qualität der Orthobildgenerierung. Im Simulationsprogramm hat zusätzlich die Bodenpixelgröße einen großen Einfluss.

Unsicherheit bei der Targetreflexionsdetektion im Orthobild

Wie in Kapitel 4.2.8 beschrieben, erfolgt die Detektion von Targetreflexionen über ein Schwellenwertverfahren. Bei unterschiedlicher Helligkeit der Targetreflexionen, verursacht z.B. durch verschmutzte

Spiegeloberfläche oder ungünstigem Einfall des Sonnenlichts, hat der Schwellenwert eine direkte Auswirkung auf die Anzahl und Größe der detektierten Targetreflexionsbereiche im Orthobild, was sich u.U. negativ auf die Genauigkeit auswirkt.

Unsicherheit durch Orthobildgenerierung

Durch die Unsicherheit der Heliostateckendetektion im Vorfeld der Orthobilderzeugung sowie der Unsicherheit der Kameraposition und einer möglichen unvollständigen Verzeichnungskorrektur unterliegt ein Orthobild mehreren Fehlereinflüssen, welche sich auf die Unsicherheit der Targetreflexionskoordinaten auswirken.

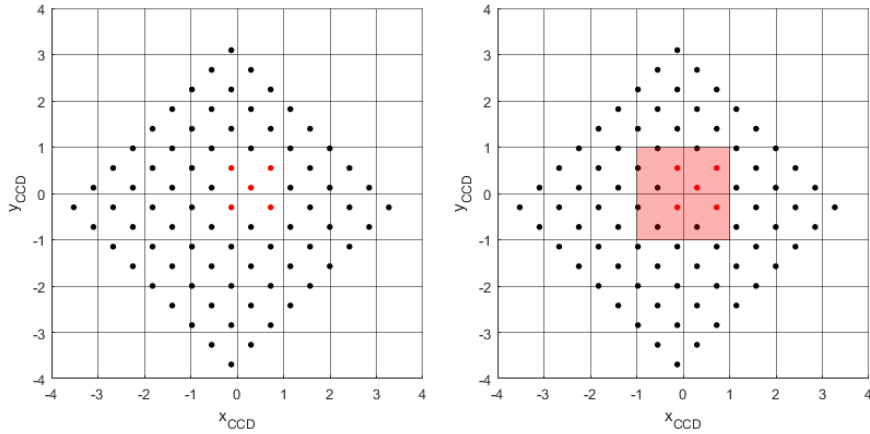
Unsicherheit durch fehlerhafte Zuordnung im Simulationsprogramm

Eine weitere Fehlerquelle liegt in der Bilderzeugung. Wie in Abschnitt 4.2.6 beschrieben, werden Pixel entsprechend der Anzahl der darin enthaltenen reflektierenden Heliostatpunkte eingefärbt. Allerdings befinden sich innerhalb dieser Pixel auch Heliostatpunkte, welche nicht dem Targetreflexionsbereich angehören. Bei der Orthobilderzeugung werden diese jedoch trotzdem jenem Bereich zugeordnet.

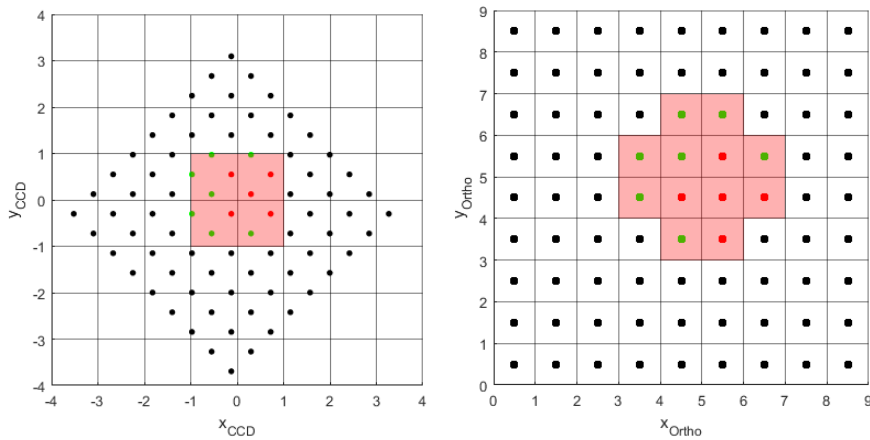
In Abb. 5.1(a) ist dies beispielhaft dargestellt. Das Raster stellt die Pixel dar. Die roten und schwarzen Punkte sind die ein Target reflektierenden bzw. nicht reflektierenden Punkte der Heliostatspiegelfläche. Die Farbe aller Pixel, welche reflektierende Punkte enthalten, wird entsprechend angepasst (Abb. 5.1(b)). Im gezeigten Beispiel enthalten jedoch alle Pixel mindestens einen das Target nicht reflektierenden Punkt (Abb. 5.1(c), grüne Punkte). Bei der anschließenden Erzeugung des Orthobilds wird deshalb mehreren Orthobildpixeln die falsche Farbe (Farbe des reflektierten Targets) zugewiesen, was in diesem Beispiel zu einer erheblichen Vergrößerung des Reflexionsbereichs führt (Abb. 5.1(d)).

Dies hat zur Folge, dass Normalenvektoren auch für Stellen der Spiegelfläche berechnet werden, die in Wirklichkeit das Target nicht reflektieren. Jenen Positionen wird dadurch ein falscher Normalenvektor zugewiesen.

Die maximale Unsicherheit einer Reflexionsposition entspricht somit der Länge der Diagonalen eines Bodenpixels, da dies die größtmögliche Distanz zwischen einem reflektierenden und einem nicht-reflektierenden Heliostatpunkt darstellt, welche basierend auf dem Orthobild beide als reflektierend gelten.



(a) Heliostatpunktwolke (schwarz) mit Targetreflexion (rot) aus Kamerasicht (b) Einfärbung der Pixel des Kamerabilds basierend auf Targetreflexion



(c) Heliostatpunkte (grün), welche im Orthobild fälschlicherweise Teil des Targetreflexionsbereichs werden

(d) Orthobild

Abbildung 5.1: Ungewollte Vergrößerung des Reflexionsbereich bei der Orthobilderzeugung

5.2 UNSICHERHEIT DER NORMALENVEKTORBESTIMMUNG

Im folgenden Abschnitt wird die Unsicherheit bei der Normalenvektorberechnung unter Einfluss der fehlerbehafteten Eingangsgrößen aus dem vorherigen Abschnitt erörtert. Zur Vereinfachung findet die Bestimmung der Unsicherheit nicht im drei-, sondern im zweidimensionalen Raum statt.

Die Unsicherheit des Normalenvektors ist ein Winkel. In Abb. 5.2 ist beispielhaft der Messaufbau in einem zweidimensionalen Koordinatensystem (x - z -Ebene) skizziert. Zu sehen sind die Kamera \vec{C} und ein Target \vec{T} über einer Heliostatspiegelfläche (zur Vereinfachung nicht gekrümmt, Normalenvektor ist \vec{n}). Ein Teil des vom Target ausstrahlen-

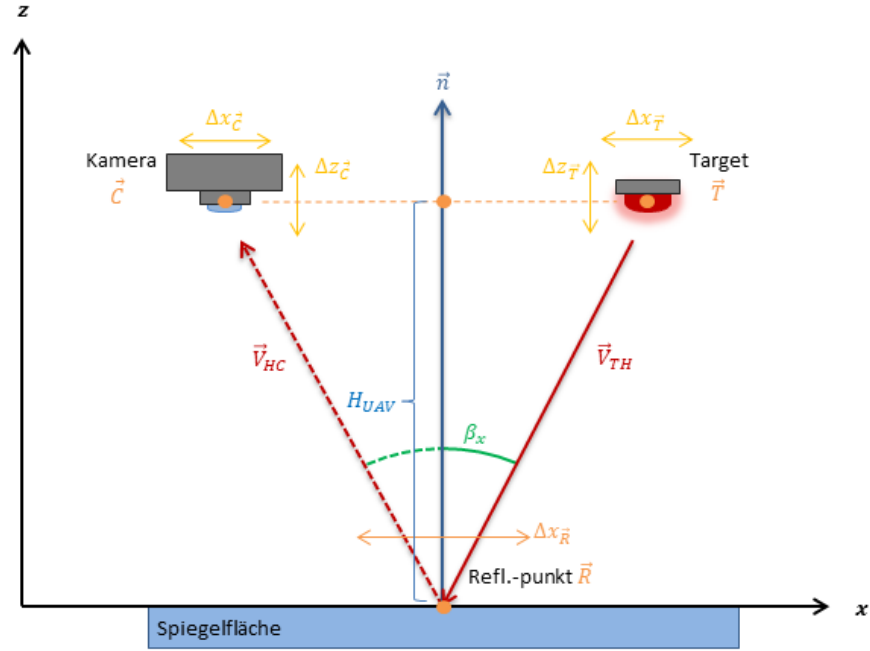


Abbildung 5.2: Schematische Seitenansicht: Unsicherheit bei der Bestimmung des Normalenvektors in x-,z-Ebene (Abstände zwischen Kamera, Target und Heliostat sowie Unsicherheiten nicht verhältnismäßig)

den Lichts \vec{V}_{TH} wird an einer bestimmten Stelle (\vec{R}) der Spiegelfläche in die Kamera reflektiert (\vec{V}_{HC}). H_{UAV} ist die Höhe des UAVs über dem Heliostaten, welche auch als z-Koordinate für Kamera und Target angenommen werden kann. Die in Abschnitt 5.1 erläuterten Unsicherheiten der Eingangsgrößen sind in der Skizze mit einem vorstehenden Δ gekennzeichnet.

Der Winkel zwischen Normalenvektor der Spiegelfläche und dem ein- bzw. ausfallenden Licht des Targets ist als β_x bezeichnet und wird über die Gleichung

$$\beta_x = \arctan\left(\frac{|x_{\vec{R}} - x_{\vec{C}}|}{H_{UAV}}\right) \quad (4)$$

berechnet. Aufgrund dem erwartbaren Größenunterschied zwischen Zähler (im cm-Bereich) und Nenner (im hohen zwei- bis niedrigen dreistelligen m-Bereich) wird unter Bezugnahme auf

$$\lim_{x \rightarrow 0} \arctan(x) = x \quad (5)$$

die Gleichung (4) zu Gleichung

$$\beta_x = \frac{|x_{\vec{R}} - x_{\vec{C}}|}{H_{UAV}} \quad (6)$$

vereinfacht. Zur Bestimmung der Winkelunsicherheit $\Delta\beta_x$ wird nacheinander jede fehlerbehaftete Größe aus Gleichung 6 abgeleitet und mit der zugehörigen Unsicherheit multipliziert, wie in Gleichung

$$\Delta\beta_x = \left| \frac{1}{H_{UAV}} \right| \cdot \Delta x_{\bar{R}} + \left| -\frac{1}{H_{UAV}} \right| \cdot \Delta x_{\bar{C}} + \left| \frac{x_{\bar{C}} - x_{\bar{R}}}{H_{UAV}^2} \right| \cdot \Delta H_{UAV} \quad (7)$$

dargestellt ist. Die einzelnen Produkte werden aufsummiert. Dies wird als Taylorreihenentwicklung bezeichnet, welche nach dem linearen Glied abgebrochen wird. Die Unsicherheit der Flughöhe ΔH_{UAV} entspricht der Unsicherheiten von Kamera- bzw. Targethöhe ($\Delta z_{\bar{C}}$ bzw. $\Delta z_{\bar{T}}$).

Zur Vervollständigung der Fehlerabschätzung der Normalenvektorbemimmung muss $\Delta\beta_x$ auf gleiche Weise auch für die y -, z -Ebene berechnet werden. Die Gesamtgenauigkeit $\Delta\beta$ ergibt sich aus nachfolgender Gleichung.

$$\Delta\beta = \sqrt{\Delta\beta_x^2 + \Delta\beta_y^2} \quad (8)$$

5.3 ERGEBNIS DER FEHLERABSCHÄTZUNG

Wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt, hat das Messverfahren den Vorteil, dass mit die Positionsgenauigkeit von Target bzw. Kamera mit zunehmendem Abstand zum Heliostaten (also mit zunehmender Flughöhe des UAVs) zur Einhaltung der angestrebten Genauigkeit der Normalenvektorbemimmung von 0.1 mrad eine immer kleinere Rolle spielt. Als Beispiel hierfür dient der zweite Term aus Gleichung (7), welcher unter Nichtberücksichtigung der restlichen Terme nach der Positionsgenauigkeit $\Delta x_{\bar{C}}$ umgestellt wird:

- Flughöhe 10 m :
 $\Delta x_{\bar{C}} = \Delta\beta_x \cdot H_{UAV} = 0.001 \text{ m}$
- Flughöhe 200 m :
 $\Delta x_{\bar{C}} = \Delta\beta_x \cdot H_{UAV} = 0.02 \text{ m}$

Es ist zu sehen, dass die benötigte Positionsgenauigkeit mit der Flughöhe skaliert. Allerdings muss auch der erste Term aus Gleichung (7) berücksichtigt werden. Der dritte Term hingegen kann aufgrund der quadrierten Flughöhe im Nenner vernachlässigt werden.

Das Einsetzen von Werten für 200 m Flughöhe in Gleichung (7) ergibt (unter Annahme einer Gesamtunsicherheit der Reflexionsposition von $\Delta x_{\bar{R}} = 0.005 \text{ m}$)

$$\Delta\beta_x = \left| \frac{1}{200 \text{ m}} \right| \cdot 0.005 \text{ m} + \left| -\frac{1}{200 \text{ m}} \right| \cdot 0.02 \text{ m} = 0.125 \text{ mrad} \quad (9)$$

und ist damit zu groß. Um eine Gesamtgenauigkeit von $\Delta\beta = 0.1 \text{ mrad}$ zu erreichen, muss der Wert für die Positionsgenauigkeit $\Delta x_{\vec{c}}$ von Target bzw. Kamera kleiner als 0.01 m sein, da $\Delta\beta_x$ - unter Berücksichtigung von Gleichung (8) und der Annahme, dass Positionsunsicherheiten in x- und y- Richtung gleich sind - nicht größer als ca. 0.07 mrad sein darf. Sollte die Genauigkeit der Reflexionsposition schlechter als angenommen sein, muss die Genauigkeit der Targetposition besser, d.h. kleiner werden. Dies widerspricht zwar den Annahmen aus Abschnitt 5.1.1, dürfte aber mit den zur Verfügung stehenden Mitteln zu erreichen sein. Somit ist davon auszugehen, dass die angestrebte Genauigkeit für die Normalenvektorberechnung eingehalten werden kann.

Mit diesem Kapitel ist der theoretische Teil dieser Arbeit abgeschlossen. Das nachfolgenden Kapitel handelt von der Entwicklung eines Targetprototyps sowie den durchgeführten praktischen Versuchen.

Der Inhalt dieses Kapitel setzt sich aus einer kurzen Zusammenfassung von Faktoren für eine erfolgreiche Heliostatvermessung, einer Vorstellung des entworfenen Targetprototyps sowie der Beschreibung erster Praxisversuche an echten Heliostaten zusammen.

6.1 ANFORDERUNGEN

Um mit dem reflexbasierten Messverfahren Heliostaten erfolgreich zu charakterisieren, sind einige Anforderungen zu erfüllen. In folgendem Abschnitt werden diese erörtert.

Ohne die in einer Aufnahme sichtbare(n) Reflexion(en) eines LED-Targets im Heliostaten lassen sich keine Oberflächennormalen bestimmen. Für eine erfolgreiche Vermessung hat daher die Gewährleistung der Sichtbarkeit der LED-Reflexionen oberste Priorität. Mehrere Faktoren haben darauf Einfluss.

Kamera und Targets müssen auf bzw. nahe der optischen Achse des Heliostaten positioniert werden. Zusätzlich müssen Kamera und Target so zum Heliostaten orientiert sein, dass dieser von der Kamera erfasst wird, und die Lichtstrahlen der LEDs die Spiegelfläche des Heliostaten erreichen können.

Um Aussagen über die Beschaffenheit der gesamten Spiegelfläche treffen zu können, ist eine gleichmäßige, dichte bzw. bestenfalls komplette Abdeckung des Heliostaten mit Targetreflexionen nötig. Durch Mittelwertbildung von gleichmäßig verteilten Oberflächennormalen kann die Gesamtausrichtung des Heliostaten bestimmt werden. Eine möglichst hohe Abdeckung von LED-Reflexionen ist folglich anzustreben. Ermöglicht wird dies durch mehrere Aufnahmen aus unterschiedlichen Positionen. Durch den Einsatz mehrerer LEDs wird die gewonnene Information (Normalenvektoren der Spiegeloberfläche) pro Aufnahme zusätzlich vervielfältigt und somit die Anzahl benötigter Aufnahmen reduziert.

Weiterhin hängt die Sichtbarkeit der Targetreflexionen von den Eigenschaften der eingesetzten LEDs ab (Farbe, Helligkeit, Abstrahlwinkel). Diese müssen auch bei großem Abstand zwischen UAV und Heliostat noch gut erkennbar sein (auch bei Tag und Sonneneinstrah-

lung). Gleichzeitig muss eine eindeutige Identifizierung der LED-Spiegelungen im Heliostaten möglich sein, d.h. LED-Reflexionen und Reflexionen der Umgebung im Heliostaten müssen unterscheidbar sein, ebenso wie die Reflexionen der verschiedenen LEDs untereinander unterscheidbar sein müssen.

Eine berechtigte Frage an dieser Stelle ist, wieso als Targets anstatt LEDs kein Laser eingesetzt wird. Dieser würde durch seine hohe Intensität die Anforderung an hohe Reichweite und optische Trennbarkeit von sonstigen Spiegelungen der Umgebung im Heliostaten in hohem Maße erfüllen. Allerdings wird ein von der Quelle ausgehendes Laserstrahlenbündel bedingt durch seine starke Bündelung und der Parallelität der einzelnen Strahlen nur auf einem kleinen Bereich der Heliostatoberfläche auftreffen, und die reflektierenden Lichtstrahlen entsprechend ebenfalls nur in eine Richtung strahlen. Da eine Reflexion im Bild nur sichtbar ist, wenn der ein Lichtstrahl die Kamera trifft, ist die Wahrscheinlichkeit eine Laserreflexion im Bild zu sehen relativ gering und für das Messverfahren somit nicht geeignet.

Für ein effizientes Messsystem ist auch das Niedrighalten des Zeitaufwands von großer Bedeutung. Der Einsatz eines UAVs ermöglicht die zügige Erfassung eines Heliostatenfelds. Die Flugzeit ist dabei durch die begrenzte Kapazität der Batterien des UAVs eingeschränkt. Da Zwischenlandungen zum Batterienwechsel zusätzlich Zeit in Anspruch nehmen, gilt es, das UAV möglichst lange in der Luft zu halten. Auf die mögliche Flugdauer hat das Gewicht großen Einfluss. Eine Anforderung an den LED-Targetverbund ist folglich auch ein möglichst geringes Gewicht. Der Stromverbrauch der LED-Targets, welche an die UAV-Batterien angeschlossen sind, sollte zur Verlängerung der Flugzeit ebenfalls gering ausfallen.

6.2 TARGETPROTOTYP

Für erste Messversuche des reflexbasierten Verfahrens wurde ein Targetprototyp entworfen, welcher in Abb. 6.1(a) zu sehen ist. Im Folgenden werden dessen Komponenten beschrieben.

Rahmen

Die Kamera, mit der Bilder aus der Luft aufgenommen werden, ist kein fester Bestandteil des UAVs, sondern befindet sich im sogenannten *Gimbal* und kann bei Bedarf entfernt oder durch andere Kameras ersetzt werden. Die Verbindung zwischen Kamera und Gimbal ist über einen Kamerasockel realisiert, welcher an der Kameraunterseite festgeschraubt und im Gimbal eingespannt wird.

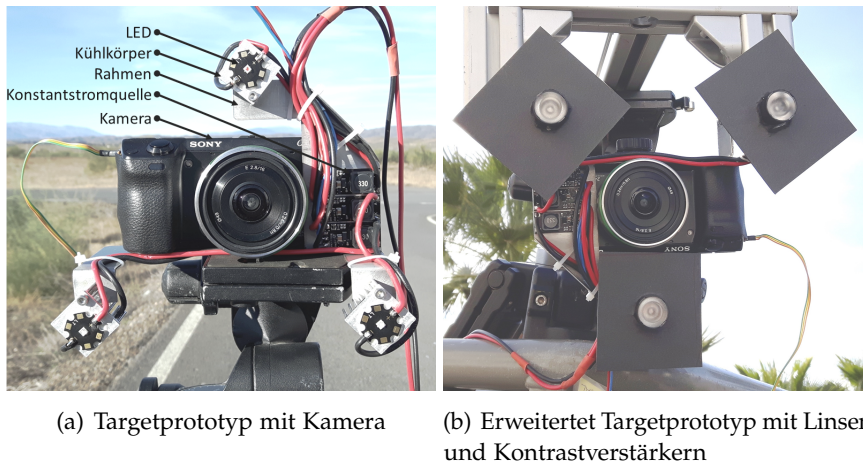


Abbildung 6.1: Targetprototyp

Die LED-Targets sollen ebenfalls nicht dauerhaft am UAV oder der Kamera angebracht sein, sondern nur erforderlichenfalls zum Einsatz kommen und deshalb abnehmbar sein. Daher wurde zunächst ein Rahmen entworfen, welcher als Grundgerüst für die Targets dient. Dadurch sind Kamera und Targets fest und unveränderlich zueinander positioniert, ohne dass Kamera und UAV baulich verändert werden müssen.

Der Rahmen wird formschlüssig mit der Kamera und dem Sockel verbunden, was eine Positionsänderung der Targets gegenüber dem UAV unterbindet. Dadurch müssen die LED-Positionen relativ zum GNSS-Empfänger des UAVs nur einmalig eingemessen werden, um dauerhaft aus den Positionskoordinaten des UAVs die Koordinaten der LEDs zu bestimmen, welche für die Heliostatnormalenberechnung benötigt werden.

Die Rahmenform ist für die bestmögliche Ausnutzung freien Raums im Gimbal ausgelegt. Über den Gimbal herausstehende Teile wurden vermieden, da diese dessen Bewegung einschränken würden. Die LEDs sind unter Berücksichtigung dieser Begrenzung möglichst weit voneinander positioniert. Außerdem wurde zwecks Gewichtsreduzierung auf eine flächenarme Form des Rahmens geachtet. Da es sich um einen Prototypen handelt, wurde der Rahmen zunächst aus einfachem Aluminiumblech gefertigt.

LEDs

Auf dem Rahmen bietet sich Platz für drei LEDs (über, links und rechts der Kamera). Um sicherzustellen, dass deren Reflexionen in

Heliostaten deutlich sichtbar sind, wurden die LEDs nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Farbe: Zur Unterscheidung der LED-Reflexionen untereinander sowie zur Abgrenzung von sonstigen Reflexionen
- Helligkeit: Ebenfalls zur Abhebung von sonstigen Reflexionen im Heliostaten; sollte möglichst stark sein
- Abstrahlwinkel: Ein großer Abstrahlwinkel erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass ein LED-Reflex in die Kamera fällt und die Reflexion somit im Bild sichtbar ist

Für den Prototyp fiel die Wahl auf Hochleistungs-LEDs mit den Farben rot, grün und blau mit einem Abstrahlwinkel von 115° (blau) bis 135° (grün).

Konstantstromquellen

Die LEDs werden über die Batterien des UAVs betrieben. Durch je eine vorgeschaltete Konstantstromquelle werden diese permanent mit gleichem Strom versorgt, unabhängig von der Spannung der UAV-Batterien. Da bereits geringe Spannungsabweichungen zum Defekt der LED führen können, ist die Konstantstromquelle in diesem Fall besonders wichtig, da die Spannung der UAV-Batterien während des Flugbetriebs durchaus schwanken kann. Zusätzlich lassen sich die LEDs über die Konstantstromquellen von außen steuern. So besteht die Möglichkeit, die LEDs zu dimmen bzw. abzuschalten, bspw. zwischen zwei Aufnahmen.

6.3 BODENGESTÜTZTE MESSUNG

Die erste Erprobung des Targetprototypen fand ohne UAV am Boden auf dem Gelände der PSA statt. Dabei wurde geprüft, ob die LED-Reflexionen in einem Heliostaten ausreichend zu sehen sind. Außerdem wurden Testaufnahmen für die Softwareentwicklung gewonnen.

6.3.1 *Messaufbau*

Wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, muss der Kamera-Target-Verbund in die Nähe der optischen Achse des Heliostaten gebracht werden. Um dies ohne UAV erreichen zu können, wurde die Ausrichtung (optische Achse) eines Heliostaten des Heliostatenfelds in horizontale Lage gebracht, sodass sich die Spiegelfläche annähernd senkrecht zum



(a) Für die bodengestützte Messung orientierter Heliostat (b) Messaufbau des bodengestützten Versuchs

Abbildung 6.2: Bodengestützter Versuch

Untergrund befand (siehe Abb. 6.2(a)). Der Kamera-Target-Verbund wurde auf einem Stativ befestigt und mittels einer fahrbaren Gelenkteleskoparbeitsbühne auf die nötige Höhe gebracht. Positionsänderungen von Kamera und Targets gegenüber dem Heliostaten zwischen zwei Aufnahmen, ähnlich eines UAV-Flugs, wurden mit Hilfe der Hebebühne nachgestellt (Abb. 6.2(b)).

Auf verschiedenen Entfernungen wurden mäanderförmige Positionsmuster abgefahren. An jeder Position wurden von der Kamera mehrere Bilder aufgenommen. Die Orientierung der Kamera wurde dabei nach jedem Bild verändert, sodass der sich Heliostat im Bild einmal mittig und je einmal nahe des rechten und linken Bildrands befand.

Im Laufe des Versuchs wurde die Sichtbarkeit der LED-Reflexionen in den Aufnahmen verbessert durch die Fokussierung des Lichts mittels Linsen (23° Abstrahlwinkel) vor den LEDs und durch die Verdunkelung der unmittelbaren Umgebung mit schwarzen Pappen (Abb. 6.1(b)).

6.3.2 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Aufnahmen des bodengestützten Versuchs gezeigt und ausgewertet. In Abb. 6.3 ist anhand der Targetreflexionen deutlich das mäanderförmige Bewegungsmuster zu erkennen. Auffällig ist auch die meist mehrfache Spiegelung einer LED pro Bild. Aufgrund der Resultate aus der Simulation war dies in gewissem Umfang so zu erwarten.

Das Auftreten von Mehrfachreflexionen deutet auf einen Heliostaten hin, dessen Spiegelform von der Idealform abweicht. In einer Aufnah-

me eines idealen Heliostaten ist pro Target nur eine einzige Reflexion sichtbar (vgl. Kapitel 4.3.3). Mehrere Reflexionen des gleichen Targets bedeuten, dass die Oberfläche teilweise von ihrer Idealform abweicht.

Aufnahmen aus größerer Distanz zum Heliostaten zeigt Abb. 6.4. ist je ein Bild mit Kameraabstand von 100 m und 140 m zu sehen. Bei genauer Betrachtung wird sichtbar, dass die Targetreflexionen mit zunehmender Entfernung von Kamera und Target zum Heliostaten geringfügig größer werden. Wie aus der Simulation bekannt, sind deutliche Größenänderungen nur bei einem Abstand erkennbar, welcher in etwa der doppelten Heliostatbrennweite entspricht. Deutlich zu sehen ist in den Abbildungen auch das mehrmalige Auftreten von Reflexionen eines Targets, was auf eine Formabweichung der Spiegeloberfläche von der Idealform hindeutet.

Form und Größe der Targetreflexionen auf dem Heliostaten, ebenso wie deren mehrfaches Auftreten in den Aufnahmen des bodengestützten Versuchs waren aufgrund der Simulationsergebnisse so zu erwarten. Für zukünftige Messungen wurden durch diese Messung wichtige Erkenntnisse erzielt, vor allem hinsichtlich der Targets (Einsatz von Linsen und Kontrastverstärkern zur Sichtbarkeitsverbesserung der LED-Reflexionen). Die Aufnahmen wurden zusätzlich dazu verwendet, die Detektion der Targetreflexionen in nicht-künstlich erzeugten Bildern mittels Bildverarbeitungsmethoden zu erproben.

6.4 LUFTGESTÜTZTE MESSUNGEN

Ein UAV-gestützter Messversuch wurde ebenfalls auf dem Gelände der PSA durchgeführt. Erstmals wurden dort die Targets in Verbindung mit dem UAV eingesetzt (siehe Abb. 6.5) und erste Aufnahmen aus der Luft erzeugt. Die Aufnahmebedingungen waren dabei allerdings nicht optimal. So wird einfallendes Sonnenlicht von einem oder mehreren Heliostaten in die Kamera reflektiert (siehe Abb. 6.6(a)).

Dieser Umstand erschwert die automatische Detektion der Targetreflexionen bzw. macht diese sogar unmöglich. Der Heliostat in der Mitte von Abb. 6.6(a) ist in Abb. 6.6(b) vergrößert dargestellt. In diesem spiegelt sich auch das UAV samt Targets. Durch die Reflexion des Sonnenlichts sind die Targets allerdings kaum zu erkennen.

Bei entsprechender Orientierung der Heliostaten und passender Positionierung des UAVs, sind Targetreflexionen zum Zeitpunkt der Bildaufnahme in mehreren Heliostaten zu sehen. Dadurch wird eine gleichzeitige Vermessung mehrerer Heliostaten ermöglicht. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 6.7 zu sehen. Dort spiegeln sich UAV und

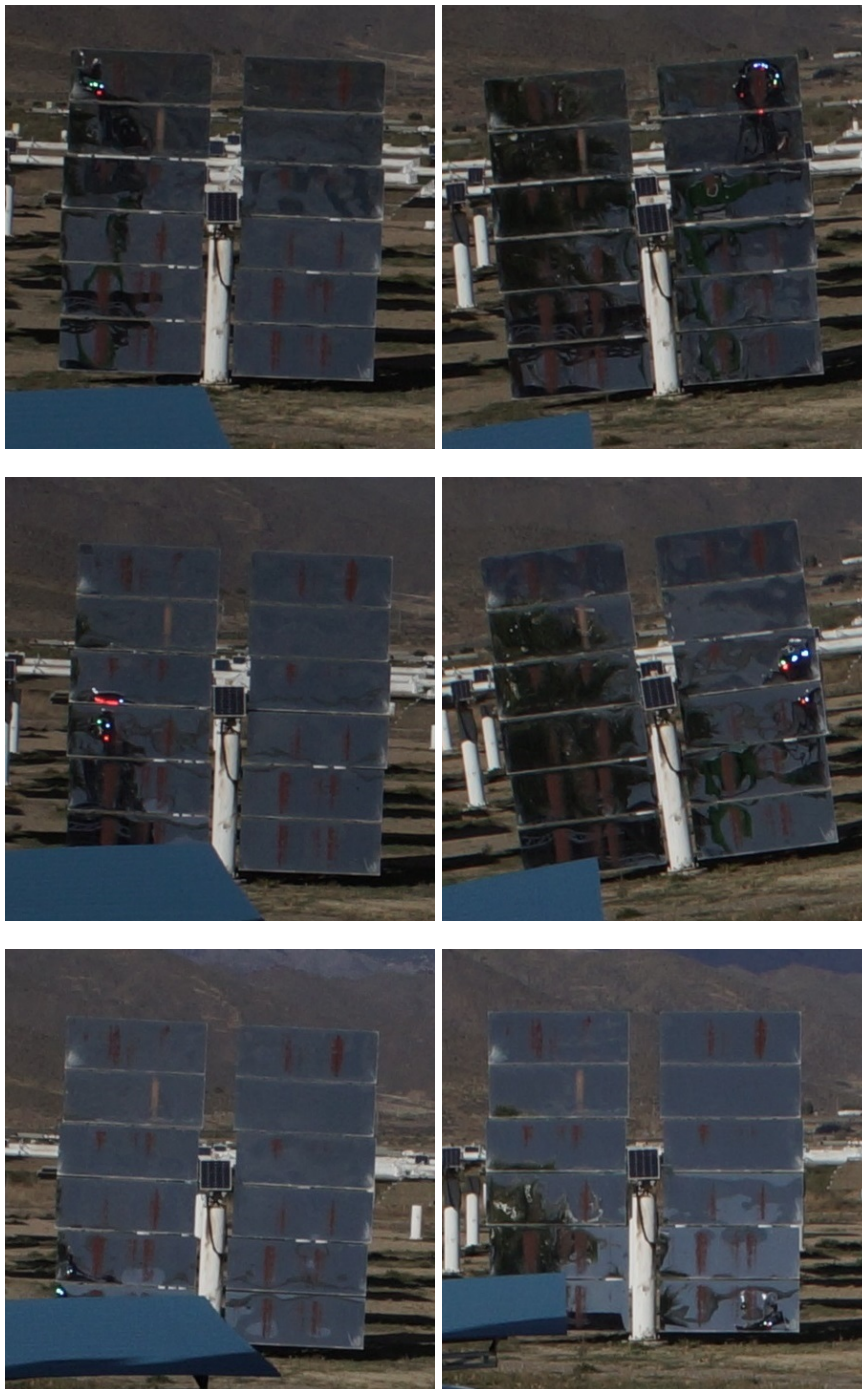


Abbildung 6.3: Bodengestützte Aufnahmen mit unterschiedlichen Positionen in gleichem Abstand zum Heliostaten

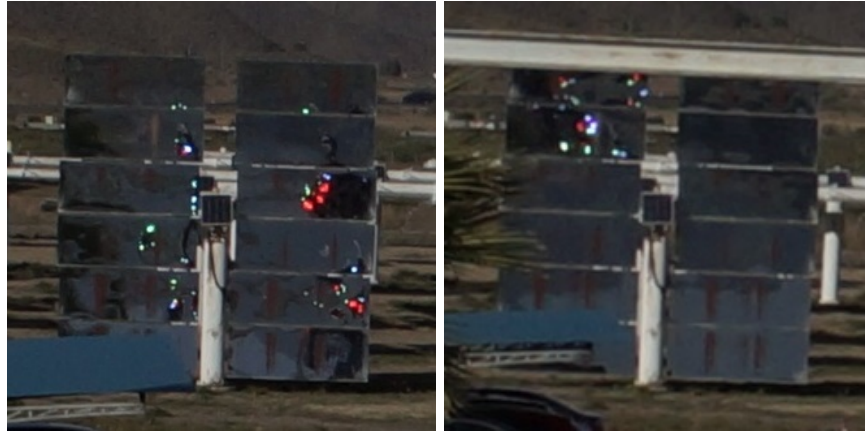
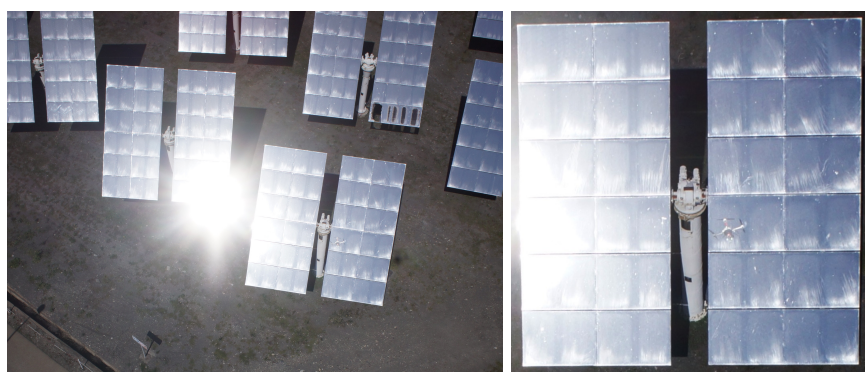


Abbildung 6.4: Bodengestützte Aufnahmen in unterschiedlichem Abstand (links: 100 m, rechts: 140 m) zum Heliostaten



Abbildung 6.5: UAV mit Kamera und Targets



(a) Reflexion des Sonnenlichts an zwei Helio- (b) Vergrößerung auf den mittigen
staten in die Kamera Heliostaten im rechten Bild

Abbildung 6.6: Aufnahme des Heliostatenfelds aus der Luft bei ungünstiger Sonneneinstrahlung

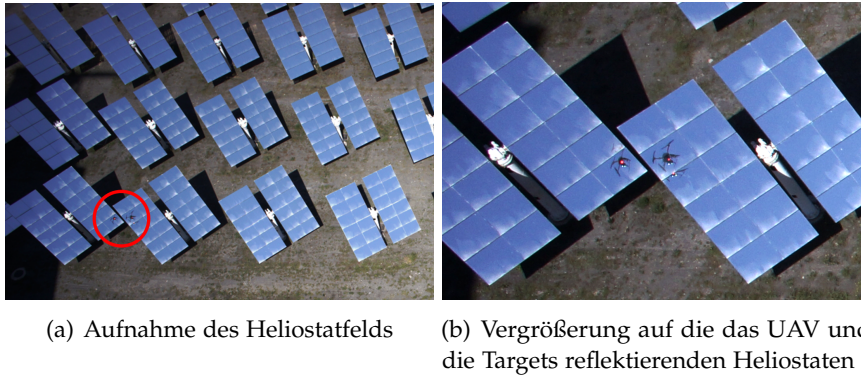


Abbildung 6.7: Reflexion von UAV und Targets in zwei Heliostaten

Targets in zwei verschiedenen Heliostaten.

Im nachfolgenden Kapitel wird neben einem Fazit auch ein Ausblick in die Zukunft des Messverfahrens gegeben. Dabei wird u.a. speziell auf die gleichzeitige Targetspiegelung in mehreren Heliostaten und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten eingegangen. Auch werden darin Überlegungen hinsichtlich eines besseren Target-Verbunds angestellt.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit dieser Arbeit wurde der Grundstein zur Realisierung dieses reflexbasierten, UAV-gestützten Verfahrens zur Heliostatcharakterisierung gelegt. Das implementierte Simulationsprogramm liefert notwendige Informationen, um geeignete Kamerapositionen vor dem Flug zu berechnen und zu testen und kann einen wichtigen Beitrag in der Flugroutenoptimierung leisten. Die Normalenvektoren der Heliostatspiegeloberfläche können mit einer annehmbaren Genauigkeit an den Reflexionspositionen reproduziert werden. Teile des Simulationsprogramms können in Zukunft, bei der Entwicklung einer umfangreichen Auswertungssoftware für dieses Verfahren übernommen werden.

Es wurde außerdem eine Fehlerabschätzung durchgeführt, bei welcher die Fehlereinflüsse der Normalenvektorbestimmung aufgezeigt wurden. Anhand der dort aufgestellten Gleichungen können sowohl die zu erwartende Genauigkeit der Normalenvektorbestimmung für beliebige Messsetups, als auch die Genauigkeitsanforderungen an die fehlerbehafteten Eingangsgrößen für eine vorgegebene Gesamtgenauigkeit bestimmt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auch ein Targetprototyp entwickelt, welcher sowohl für Messungen am Boden als auch zusammen mit dem UAV einsetzbar ist. Erste, vielversprechende Tests an realen Heliostaten wurden damit bereits am Boden und in der Luft durchgeführt.

In allen genannten Bereichen sind in Zukunft Erweiterungen möglich. Für das Simulationsprogramm wäre eine naheliegende Erweiterung bspw., das Messverfahren für ein gesamtes Heliostatenfeld anstatt an einem einzelnen Heliostaten zu simulieren, um so eine optimale Befliegung des Felds vorab zu planen. Zusätzlich könnten die Bewegungsmodelle der Heliostaten implementiert werden, um eine Erfassung während des laufenden Betriebs zu simulieren. Ebenso könnte die Sonne samt Sonneneinstrahlung hinzugefügt werden, um Kenntnis über eventuelle Konflikte (Targetreflexionen bei unpassender Sonneneinstrahlung teilweise nicht oder nur schwer sichtbar) zu erlangen.

Eine weitere Option zur Erweiterung des Simulationsprogramms wäre eine Funktion, die basierend auf den Targetreflexpositionen automatisch einen bzw. mehrere Aufnahmestandpunkte der Kamera für jeden Heliostaten bestimmt, durch die der Heliostat möglichst gut durch Reflexionen abgedeckt wird. Bei der Flugroutenplanung könnten diese

Punkte gegebenenfalls berücksichtigt werden.

Hinsichtlich weiterer luftgestützter Praxistests wäre bspw. die Probe eines Spezialfalls des Messverfahrens denkbar. Die im vorherigen Kapitel in Abb. 6.7 gezeigte gleichzeitige Targetreflexion in mehreren Heliostaten kann derart ausgenutzt werden, dass bestenfalls alle Heliostaten eines Heliostatenfelds durch eine bzw. einige wenige Aufnahmen vermessen werden können. Dazu sind alle Heliostaten so auszurichten, dass sich ihre optischen Achsen (für idealisierte und perfekt kalibrierte Heliostaten) in einem Punkt schneiden. Aufgrund der während der Messung noch fehlenden Feinkalibrierung ergibt sich ein Raum- bzw. Flächenbereich bei vorgegebener Flughöhe, welchen alle Heliostatennormalen in einem geringen Abstand zueinander durchkreuzen. In diesem Bereich muss das UAV nur eine sehr geringe Anzahl an Positionen ansteuern, damit Targetreflexionen in allen Heliostaten sichtbar sind. Innerhalb weniger Minuten ließe sich so ein gesamtes Heliostatfeld erfassen und wäre damit hinsichtlich des zeitlichen Aufwands jedem anderen Messverfahren überlegen.

Durch die Ergebnisse weiterer Tests an realen Heliostaten ist in Zukunft auch eine endgültige, umfassende Validierung des Simulationsprogramms möglich. Das bisherige Programm beruht bei der Erzeugung der Targetreflexionen teilweise noch auf Annahmen, welche bisher nicht verifiziert werden konnten.

Der als Prototyp vorliegende Targetverund wird in Zukunft voraussichtlich durch eine deutlich gewichtsreduzierte Variante aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff ersetzt. Möglich wäre auch das Anbringen zusätzlicher LEDs, um pro Bild noch mehr Normalenvektoren bestimmen zu können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit dem implementierten Simulationsprogramm, der Fehlerabschätzung sowie den ersten Praxistests eine gute Grundlage für die erfolgreiche weitere Umsetzung bzw. Weiterentwicklung dieses Messverfahrens zur Heliostatcharakterisierung gelegt wurde.

LITERATURVERZEICHNIS

- Berenguel, M., Rubio, F., Valverde, A., Lara, P., Arahall, M., Camacho, E., and López, M. (2004). An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant. *Solar energy*, 76(5):563–575.
- Convery, M. R. (2011). Closed-loop control for power tower heliostats. In *High and Low Concentrator Systems for Solar Electric Applications VI*, volume 8108, page 81080M. International Society for Optics and Photonics.
- Göhring, F., Hilgert, C., Ulmer, S., Prah, C., and Röger, M. (2017). Verfahren zur vermessung von heliostaten. DE Patent App. DE102015217086.
- Kribus, A., Vishnevetsky, I., Yoge, A., and Rubinov, T. (2004). Closed loop control of heliostats. *Energy*, 29(5-6):905–913.
- Peña-Cruz, M. I., Arancibia-Bulnes, C. A., Iriarte-Cornejo, C., Cabanillas, R. E., and Estrada, C. A. (2012). Heliostat characterization by optical techniques and image processing. In *ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability collocated with the ASME 2012 10th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, pages 353–362. American Society of Mechanical Engineers.
- Prah, C., Stanicki, B., Hilgert, C., Ulmer, S., and Röger, M. (2013). Airborne shape measurement of parabolic trough collector fields. *Solar Energy*, 91(0):68–78.
- Röger, M. (2017). Heliostat performance testing guideline - status update sept. 2017. In *SolarPACES Task III Workshop*.
- Röger, M., Prah, C., and Ulmer, S. (2010). Heliostat shape and orientation by edge detection. *Journal of Solar Energy Engineering*, 132(2):021002.
- Sanchez, M. (2018). Scalable heliostat calibration system (short) - how to calibrate your whole heliostat field in a single night.
- Schell, S. (2011). Design and evaluation of esolar ‘s heliostat fields. *Solar Energy*, 85(4):614–619.
- Zavodny, M., Slack, M., Huibregtse, R., and Sonn, A. (2015). Tower-based csp artificial light calibration system. *Energy Procedia*, 69:1488–1497.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit habe ich bisher keinem anderen Prüfungsamt in gleicher oder vergleichbarer Form vorgelegt. Sie wurde bisher auch nicht veröffentlicht.

Stuttgart, Juli 2018

Lewin L. Hajer, 27. Juli 2018